

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO



Matheus Vieira Moreira

**VERIFICAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MODELO DE
PERFURAÇÃO OHARA PARA DETERMINAÇÃO DA TAXA DE
PENETRAÇÃO EM TEMPO REAL NOS POÇOS DO PRÉ-SAL
BRASILEIRO**



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

Escola Politécnica
Centro de Tecnologia
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, 2013

Matheus Vieira Moreira

DRE: 108042497

**VERIFICAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MODELO DE
PERFURAÇÃO OHARA PARA DETERMINAÇÃO DA TAXA DE
PENETRAÇÃO EM TEMPO REAL NOS POÇOS DO PRÉ-SAL
BRASILEIRO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia do Petróleo da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Paulo Couto, Dr. Eng.

Rio de Janeiro

2013/1

Vieira Moreira, Matheus

Verificação da aplicabilidade do modelo de perfuração Ohara para determinação da taxa de penetração em tempo real nos poços do Pré-Sal brasileiro / Matheus Vieira Moreira. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

xiii, 80 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Couto

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia do Petróleo, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 81 – 82.

1. Modelos de Perfuração. 2.ROP. 3. Pré-Sal Brasileiro. I. Couto, Paulo *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia do Petróleo. III. Verificação da aplicabilidade do modelo de perfuração Ohara para determinação da taxa de penetração em tempo real nos poços do pré-sal brasileiro.

Matheus Vieira Moreira

**VERIFICAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MODELO DE
PERFURAÇÃO OHARA PARA DETERMINAÇÃO DA TAXA DE
PENETRAÇÃO EM TEMPO REAL DE POÇOS DO PRÉ-SAL
BRASILEIRO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia do Petróleo da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Rio de Janeiro 02 de setembro de 2013.

Prof.. Paulo Couto, Dr.Eng – Orientador

Prof. José Luis Drumond Alves, D.Sc.

Shiniti Ohara, Ph.D.

Rio de Janeiro

2013/1

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, avós e irmão pelo carinho, compreensão e, acima de tudo, imenso amor ao longo de todos os anos de minha trajetória na Graduação. Que eles tenham a certeza de que tentei “fazer a minha parte” da melhor forma possível, aprendendo com os erros e comemorando os acertos e, principalmente, escutando seus ensinamentos. Amo-vos!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela sua presença constante em minha vida. Os obstáculos que se apresentaram ao longo desta jornada certamente colocaram minha fé à prova. Nos momentos de maior fraqueza, Sua fidelidade e Seu amor infinitos me confortaram e indicaram o caminho certo seguir.

Gostaria de registrar meu agradecimento especial ao Profs. Paulo Couto e Alexandre Leiras pelo comprometimento ímpar em auxiliar-me no meu desenvolvimento acadêmico e profissional ao longo desse longo e memorável período de convivência. A confiança depositada em minhas qualidades como aluno e pessoa foi determinante para a superação das maiores dificuldades atravessadas nesses cinco anos e para meu amadurecimento.

Dedico também meus sinceros agradecimentos ao Prof. Shiniti Ohara. Sua irretocável dedicação ao longo do ciclo profissional da Graduação e seu incentivo às atividades da Equipe Petrobowl, bem como ao meu Projeto de Graduação, foram também de suma importância para o desenvolvimento de meu lado profissional.

Agradeço ao PFRH-02/LAMCE – COPPE/UFRJ, em especial aos Prof. Luis Landau, José Luis Alves e à Sr^a Mônica Caruso, pelo apoio financeiro durante a realização desse trabalho.

Registro ainda meus agradecimentos ao Prof. Bernt Aadnoy pelo auxílio no desenvolvimento da revisão bibliográfica do presente trabalho, além da oportunidade única de convívio com um profissional de seu nível de qualificação técnica e incomparáveis sabedoria e humildade.

Ao meu querido amigo Mario Ledes Teixeira, por todo o auxílio durante a realização deste trabalho e a troca de ideias sobre possibilidades de futuro profissional como Engenheiro de Petróleo.

Aos profs. Átila Freire, Juliana Loureiro, José Luis, Fábio Ramos, Luca Moriconi por mostrarem na prática o significado verdadeiro da interdisciplinaridade. Agradeço pelo acolhimento recebido desde o primeiro momento em que fiz do Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos – NIDF/COPPE, minha segunda casa.

Aos meus queridos amigos do NIDF, tenham certeza da sinceridade das palavras de agradecimento que dedico a todos vocês. A convivência durante este período de um ano e meio não se apagará nunca da minha memória. Em particular, gostaria de agradecer aos amigos Luís Carrión e Ricardo Fernandes, o “Jiu-Jitsu”, por terem sido fiéis companheiros nos momentos mais críticos do desenvolvimento do projeto, mas principalmente pelas agradáveis conversas e momentos de descontração e brincadeiras sem os quais não seria possível a conclusão dos estudos para as provas e dos trabalhos.

Aos meus grandes companheiros das Equipes Petrobowl das quais pude participar, em especial os amigos Luís Chagas e Andrej Tommasi, recebam meus sinceros agradecimentos e os votos de sucesso ao longo de suas promissoras e, certamente, brilhantes jornadas na vida profissional.

Aos meus amigos do Colégio de São Bento do Rio de Janeiro, em especial ao Leonardo Nocito, Henrique Massari, Daniel Ribeiro, Luiz Gustavo, Arhur Julião, o “Kalango” e Oto Fábio, muito obrigado por suas amizades e constante presença ao meu lado.

Finalmente, gostaria de dedicar este último parágrafo aqueles que certamente são mais do que amigos, sendo verdadeiros irmãos por opção: Pedro Gabriel, Jonathas Santana, Guilherme Silveira, Raphael Pádua, o “Vascão”, Alexandre Ramos, Tiago Fittipaldi, Leonardo Malouf e Márcio Bruno. Saibam que o carinho e o apreço que tenho por vocês rompe qualquer barreira de distância e tempo. O sentimento de amizade cultivado é único e nunca será abalado. Sentirei muitas saudades dessa maravilhosa convivência ao longo dessa grande aventura que chamamos de faculdade e espero estar sempre presente ao lado de vocês. Muitíssimo obrigado!

“Ora et Labora”

São Bento de Núrsia, *Regula Benedicti*.

“Calma, Fibra e Classe”

Agostinho Moreira

Verificação da aplicabilidade do modelo de perfuração Ohara para determinação da taxa de penetração em tempo real de poços do Pré-Sal brasileiro

Autor: Matheus Vieira Moreira

Orientador: Prof. Paulo Couto, Dr. Eng.

Monografia apresentada à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro do Petróleo.

Este trabalho se destina à verificação da aplicabilidade do modelo de perfuração Ohara para a determinação da taxa de penetração para poços perfurados na área do Pré-Sal brasileiro. A revisão bibliográfica realizada teve como principal foco o estudo no ambiente de fundo de poço dos efeitos de diversos parâmetros operacionais, como Profundidade, Peso sobre Broca, Velocidade de Rotação da Coluna, Diâmetro de Broca, Hidráulica de Broca, Peso de Fluido de Perfuração, Pressão de Poros, entre outros. A partir da determinação dos mecanismos físicos que relacionam a taxa de penetração com cada um dos parâmetros operacionais, registrados e acompanhados pelo Sistema de Monitoração de sonda (*mud logging*), são então apresentados modelos de perfuração visando o estabelecimento do tratamento matemático da realidade física do problema.

A revisão de diferentes modelos leva à escolha pelo modelo Ohara, o qual propõe como abordagem matemática a realização de uma regressão múltipla dos parâmetros operacionais visando à previsão da taxa de penetração para litologias e fases do poço estabelecidas. O procedimento adotado se realiza em função também de parâmetros adimensionais, sendo estas funções dos parâmetros operacionais. Por fim, é proposto um estudo de caso onde dados de três poços da área do Pré-Sal foram analisados e para os quais foram inferidos valores respectivos de taxa de penetração em três diferentes litologias encontradas pelos três poços, quais sejam: Sal, SAG (rocha carbonática) e Basalto (embasamento ígneo).

A análise global dos resultados verifica ser factível a aplicabilidade do modelo estudado para essa área, sendo ressaltada a importância da aquisição de um maior e

melhor número de conjuntos de dados objetivando o aumento da confiabilidade do modelo.

Palavras-chave: 1.Modelos de Perfuração; 2.ROP; 3.Pré-Sal Brasileiro

Verification of the applicability of Ohara's drilling model in determining real-time rate of penetration in Brazilian pre-salt wells.

Author: Matheus Vieira Moreira

Advisor: Paulo Couto, Dr. Eng.

Monography presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Petroleum Engineer.

This work intends to verify the applicability of Ohara's drilling model to Brazilian Pre-Salt wells. The literature revision focused on the studies on bottom hole environment effects of various operational parameters such as Depth, Weight on Bit, Rotary Speed, Bit Diameter, Bit Hydraulics, Mud Weight, Pore Pressure, among others. From the determination of the physical mechanisms that relate the penetration rate with each of the operating parameters recorded and tracked by the rig's Monitoring System (mud logging), are then presented some drilling models that aim to establish the mathematical treatment of the physical reality of the problem.

A review of different models leads to the choice of Ohara's, which proposes a mathematical approach of multiple regression analysis of sets of the various operational parameters in order to predict the penetration rate for different types of lithology and also different well diameters. This procedure is also performed due to dimensionless parameters, which are functions of the operating parameters. Finally, it is proposed a case study of a group of three wells drilled in Brazil's Pre-Salt area, where its dataset was analyzed and for each well rate of penetration was inferred, respective to the three different lithology types encountered: Salt rock, SAG (carbonate rock) and Basalt (igneous rock).

The analysis of the results verifies the feasibility of the use of Ohara's drilling model for this area, being also emphasized the importance of acquiring a bigger and more qualified well dataset, in order to confer improvements in the model reliability.

Key words: 1.Drilling Models; 2.ROP; 3.Brazilian Pre-Salt

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xviii
LISTA DE TABELAS.....	xviii
LISTA DE EQUAÇÕES.....	xix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo	1
1.2 Motivação	2
2 EVOLUÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE PERFURAÇÃO.....	3
2.1 Classificações das modalidades de perfuração	3
2.1.1 Perfuração Percussiva.....	3
2.1.2 Perfuração Rotativa	4
2.1.3 Perfuração Percussiva Rotativa.....	4
2.2 Classificações e Tipos de Sondas Rotativas.....	5
2.3 Sistemas de uma Sonda de Perfuração e Coluna de Perfuração	8
2.3.1 Sistema de Rotação	8
2.3.2 Sistema de Circulação de Fluidos.....	12
2.3.3 Sistema de Monitoração de Poços	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM O ROP	17
3.1 Introdução	17
3.2 Cuninngham & Murray, 1955	17
3.3 Eckel, 1957	18
3.4 Cunningham & Eenik, 1959	20
3.5 Van Lingen & Garnier, 1959	21
3.6 Teale, 1965.....	26
3.7 Pessier & Fear, 1992	27
4 REVISÃO DOS MODELOS DE PERFURAÇÃO	32
4.1 Introdução	32
4.2 Modelo de Maurer.....	32

4.3	Modelo de Galle & Woods	33
4.4	Modelo de Cunningham.....	34
4.5	Modelo de Bourgoyne & Young	34
4.6	Modelo de Reza & Alcocer	36
4.7	Modelo de Ohara.....	37
5	ESTUDO DE CASO – MODELO OHARA APLICADO AO PRÉ-SAL	39
6	METODOLOGIA E RESULTADOS.....	40
6.1	Obtenção dos parâmetros X_j	40
6.2	Obtenção dos Resultados para os Poços A e B	41
6.3	Filtragem dos resultados dos Poços A e B	54
6.4	Cálculo dos coeficientes do Poço C e resultados correspondentes	66
6.5	Resultados da modelagem do ROP para o Poço C com coeficientes calculados e da filtragem aplicada.....	68
7	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	76
7.1	Poços A e B.....	76
7.2	Poço C.....	77
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática de sonda percussiva (Fonte: http://www.jcninspecoes.com.br/metodos/)	3
Figura 2 – Representação esquemática de uma sonda rotativa (Fonte: http://dc150.4shared.com/doc/VoVICBAZ/preview.html)	4
Figura 3 – Classificações e tipos de sondas de perfuração.....	5
Figura 4 – Plataforma fixa típica [8].....	6
Figura 5 – Plataforma do tipo auto-elevável [8].....	6
Figura 6 – Representação esquemática de uma plataforma TLP (Fonte: http://www-it.jwes.or.jp/weld_example_w_e.html)	7
Figura 7 – Navio Sonda [8]	7
Figura 8 – Representação simplificada do Sistema de Rotação de sonda (Adaptado de BOURGOYNE, A. T. J., MILLHEIM, K. K., CHENEVERT, M.E., YOUNG, F. S. J.,1991, <i>Applied Drilling Engineering</i> . 2nd printing, Richardson, Society of Petroleum Engineers)	8
Figura 9 – Dois <i>kellys</i> de diferentes seções [9]	9
Figura 10 – Cabeça de Injeção [8]	9
Figura 11 – Mesa Rotativa [9]	10
Figura 12 – <i>Top Drive</i> [8]	10
Figura 13 – Motor de fundo [8].....	11
Figura 14 – O Sistema Poço-Fluido (Adaptado de BOURGOYNE, A. T. J., MILLHEIM, K. K., CHENEVERT, M.E., YOUNG, F. S. J.,1991, <i>Applied Drilling Engineering</i> . 2nd printing, Richardson, Society of Petroleum Engineers)	12
Figura 15 – Comandos, Tubos de Perfuração Pesados, Tubos de Perfuração e Ferramenta de M/LWD [9,12].....	14
Figura 16 – Unidade de monitoração de parâmetros e tela com apresentação dos parâmetros [12].....	16
Figura 17 – ROP vs Pressão de Confinamento (Adaptado de [13])	18
Figura 18 – Regiões distintas do corpo de prova: A – Não Plastificada & B – Plastificada [14]	19

Figura 19 – Reboco e acúmulo de cascalhos no fundo do poço [16].	21
Figura 20 – ROP vs Pressão de fluido constante [17].	22
Figura 21 – ROP vs RPM com pressão de poros constante e igual à hidrostática de fluido [16].	24
Figura 22 – ROP (%) vs Pressão de Fluido [16].	25
Figura 23 – Comparação dos efeitos de retenção estáticos e dinâmicos [16]	25
Figura 24 – Enceramento de fundo de poço [19]	29
Figura 25 – Broca TCI encerada [19].	29
Figura 26 – Enceramento típico de broca ST [19].	29
Figura 27 – Desempenho energético das brocas com e sem rolamento problemático [19]	31
Figura 28 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço A, Sal, Fase de 17,5"	42
Figura 29 - ROP real vs ROP calculado - Poço A - Sal - 17,5"	43
Figura 30 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço A, Sal, Fase de 12,25"	44
Figura 31 - ROP real vs ROP calculado - Poço A - Sal - 12,25"	45
Figura 32 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço A, SAG, Fase de 8,5"	46
Figura 33 - ROP real vs ROP calculado - Poço A - SAG - 8,5"	47
Figura 34 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço A, IGN, Fase de 8,5"	48
Figura 35 - ROP real vs ROP calculado - Poço A - IGN - 8,5"	49
Figura 36 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço B, Sal, Fase de 17,5"	50
Figura 37 - ROP real vs ROP calculado - Poço A - Sal - 17,5"	51
Figura 38 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço B, Sal, Fase de 12,25"	52
Figura 39 - ROP real vs ROP calculado - Poço A - Sal - 12,25"	53
Figura 40 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço A, Sal, Fase de 17,5" a cada 5 metros.	54
Figura 41 - ROP real vs ROP calculado - Poço A - Sal - 17,5" a cada 5 metros	55
Figura 42 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço A, Sal, Fase de 12,25" a cada 5 metros.	56
Figura 43 - ROP real vs ROP calculado - Poço A - Sal - 12,25" a cada 5 metros.	57

Figura 44 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço A, SAG, Fase de 8,5" a cada 5 metros.....	58
Figura 45 - ROP real vs ROP calculado - Poço A - SAG - 8,5" a cada 5 metros	59
Figura 46 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço A, IGN, Fase de 8,5" a cada 5 metros	60
Figura 47- ROP real vs ROP calculado - Poço A - IGN - 8,5" a cada 5 metros	61
Figura 48 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço B, Sal, Fase de 17,5" a cada 5 metros.....	62
Figura 49 - ROP real vs ROP calculado - Poço B - Sal - 17,5" a cada 5 metros	63
Figura 50 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço B, Sal, Fase de 12,25" a cada 5 metros.....	64
Figura 51 - ROP real vs ROP calculado - Poço B - Sal - 12,25" a cada 5 metros.....	65
Figura 52 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço C, Sal, Fase de 17,5" ...	69
Figura 53 - ROP real vs ROP calculado - Poço C - Sal - 17,5"	69
Figura 54 - ROP real vs ROP calculado - Poço C - Sal - 12,25"	70
Figura 55 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço C - Sal - 12,25"	70
Figura 56 - ROP real vs ROP calculado - Poço C - SAG - 8,75"	71
Figura 57 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço C, SAG, Fase de 8,75"	71
Figura 58 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço C, IGN, Fase de 8,75"	72
Figura 59 - ROP real vs ROP calculado - Poço C - IGN - 8,75"	72
Figura 60 – Taxa de Penetração vs Profundidade – Poço C, Sal, Fase de 17,5" a cada 5 metros.....	73
Figura 61 - ROP real vs ROP calculado - Poço C - Sal - 17,5"	73
Figura 62 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço C, Sal, Fase de 12,25"	74
Figura 63 - ROP real vs ROP calculado - Poço C, Sal, Fase de 12,25"	74
Figura 64 - ROP real vs ROP calculado - Poço C, SAG, Fase de 8,75"	75
Figura 65 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço C, SAG, Fase de 8,75"	75
Figura 66 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço C, Sal, Fase 17,5" a partir da regressão múltipla	79

Figura 67 - ROP real vs ROP calculado – Poço C, Sal, Fase de 17,5” a partir da regressão múltipla.....	80
---	-----------

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - – Altura dos dentes/cortadores em função do diâmetro de broca.....	41
Tabela 2 – Coeficientes b1 a b6 dos Poços A e B e os coeficientes calculados para C para o Sal na fase de 17,5”	66
Tabela 3 – Coeficientes b1 a b6 dos Poços A e B e os coeficientes calculados para C para o Sal na fase de 12,25”	67
Tabela 4 – Coeficientes b1 a b6 dos Poços A e B e os coeficientes calculados para C para o SAG na fase de 12,25”	67
Tabela 5 – Coeficientes b1 a b6 dos Poços A e B e os coeficientes calculados para C para o o embasamento ígneo na fase de 8,5”	68

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Definição de Energia Mecânica Específica	26
Equação 2 – Torque como função do coeficiente de atrito específico	27
Equação 3 – Descrição do ROP em função da MSE	28
Equação 4 – Definição da Eficiência Mecânica em função da MSE	28
Equação 5 – Modelo de Maurer para o ROP	32
Equação 6 - Modelo de Galle & Woods para o ROP	33
Equação 7 - Modelo de Galle & Woods para o desgaste dos dentes da broca	33
Equação 8 – Modelo de Galle & Woods para o desgaste dos rolamentos da broca ...	33
Equação 9 – Modelo de Cunningham para o ROP	34
Equação 10 – Modelo de Bourgoyne & Young para o ROP	34
Equação 11 – Cálculo do parâmetro de compactação normal de rochas do modelo de Bourgoyne & Young	34
Equação 12 – Cálculo do parâmetro de subcompactação de rochas do modelo de Bourgoyne & Young	35
Equação 13 – Cálculo do parâmetro de diferencial de pressão do modelo de Bourgoyne & Young	35
Equação 14 – Cálculo do parâmetro de peso sobre broca do modelo de Bourgoyne & Young	35
Equação 15 – Cálculo do parâmetro de rotação de broca do modelo de Bourgoyne & Young	35
Equação 16 – Cálculo de desgaste do dente do modelo de Bourgoyne & Young	35
Equação 17 – Cálculo do parâmetro de hidráulica de broca do modelo de Bourgoyne & Young	35
Equação 18 – Modelo de Bourgoyne & Young para o desgaste dos dentes da broca	36
Equação 19 – Modelo de Bourgoyne & Young para o desgaste dos rolamentos da broca	36
Equação 20 – Modelo de Reza & Alcocer para o ROP	36

Equação 21 – Modelo de Reza & Alcocer para o desgaste dos dentes da broca.....	36
Equação 22 – Modelo de Reza & Alcocer para o desgaste dos rolamentos da broca.	37
Equação 23 – Modelo de Ohara para o ROP.....	37
Equação 24 – Cálculo do parâmetro de peso sobre broca do modelo de Ohara.....	37
Equação 25 – Cálculo do parâmetro de diferencial de pressão do modelo de Ohara .	37
Equação 26 – Cálculo do parâmetro de compactação do modelo de Ohara.....	38
Equação 27 – Cálculo do parâmetro de hidráulica de broca do modelo de Ohara	38
Equação 28 – Cálculo da força de jato para o modelo de Ohara	38
Equação 29 – Cálculo da perda de carga para o modelo de Ohara	38
Equação 30 – Cálculo do parâmetro de altura do dente da broca do modelo de Ohara	38
Equação 31 – Cálculo da diferença de Pressão.....	40
Equação 32 – Cálculo do gradiente de Poros	40
Equação 33 – Procedimento de cálculo dos parâmetros bi do poço a ser verificado..	66

1 INTRODUÇÃO

A perfuração de poços se desenvolveu muito desde que Col. Drake atingiu seu objetivo em 1859, através da construção do primeiro poço petrolífero [1]. De lá para cá, a complexidade das condições em que se apresentam os reservatórios aumentou imenso, sendo cada vez mais necessária a garantia da segurança e da viabilidade econômica dos projetos de poços. A título de exemplo, a camada do Pré-Sal, principal província petrolífera do cenário exploratório brasileiro atualmente, vem gerando uma expectativa de arrecadação de R\$ 10 bi, apenas, no momento do leilão do bloco de Libra [2]. Além disso, somente a Petrobras - determinada como operadora exclusiva dessa província, com participação mínima de 30% nos blocos [3] - empenha-se em um plano ambicioso de investimentos no valor de US\$ 236,7 bi entre 2013 e 2017, dos quais US\$ 147,5 bi (62%) apenas no segmento de Exploração & Produção, configurando o maior programa corporativo de investimento no mundo [4]. Dessa forma, a abordagem técnica dos projetos e construção de poços tornou-se fundamental para a atividade de perfuração, constituindo, de fato, uma ciência.

O principal parâmetro que apresenta a velocidade com a qual se desenvolve a perfuração, é a Taxa de Penetração de Broca (ROP), definida como a distância perfurada pela broca de por unidade de tempo. Ele é afetado por diversos fatores como a força atuante na broca, ou peso sobre broca (WOB), a velocidade de rotação da broca (RPM), a diferença de pressão entre a exercida pelo fluido de perfuração e a do fluido contido nas rochas, a limpeza do fundo do poço, o aumento de resistência da rocha quanto maior a profundidade, entre outros. Dessa forma, foi estudado como tais fatores se relacionam com o ROP, qual a mecânica pela qual se desenvolvem e como são modeladas matematicamente tais relações.

1.1 Objetivo

A proposta do presente trabalho configura a implementação do modelo desenvolvido por Ohara [5] para poços no Pré-Sal brasileiro, bem como a verificação de sua aplicabilidade como solução de acompanhamento em tempo real da taxa de penetração. O ROP revela-se um parâmetro chave em diversas operações da sonda, variando desde o simples monitoramento da aproximação do objetivo até a indicação primária de um possível fluxo indesejado da formação rochosa para o interior do poço (ou, simplesmente, *kick*). A partir de sua intrínseca relação com o tempo, os registros de ROP podem ser também utilizados para a avaliação e otimização do tempo de

sonda e, em última análise, do custo da etapa de perfuração, por meio de sua comparação com o período gasto em outras atividades, principalmente o tempo não produtivo de sonda (*NPT – Non Productive Time*).

1.2 Motivação

Tendo em vista a magnitude dos montantes citados, pode-se destacar a importância fundamental da disciplina e da otimização de processos no gerenciamento de recursos financeiros na exploração de novas e desafiadoras províncias petrolíferas. Determinante ao encontro dessas duas diretrizes, o fator tempo é uma das grandes preocupações durante toda a vida de um poço. No entanto, seu impacto nas etapas de perfuração mostra-se ainda mais significativo. Estimativas de taxas diárias de navios-sonda operantes em águas ultra profundas – como é o caso de algumas das unidades utilizadas na Bacia de Santos – apontam um valor médio de US\$ 469 mil/dia [6]. Dessa forma, o tempo de sonda é um parâmetro chave para a determinação da economicidade e do controle da operação.

2 EVOLUÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE PERFURAÇÃO

De modo a proporcionar um melhor entendimento ao leitor ainda não familiarizado com alguns dos parâmetros ainda a serem apresentados e fundamentais para a compreensão do conteúdo dos próximos capítulos, dedica-se o presente capítulo para uma breve apresentação da operação de perfuração de poços.

2.1 Classificações das modalidades de perfuração

2.1.1 Perfuração Percussiva

A realização da etapa de perfuração de um poço de petróleo ocorre por meio de uma sonda de perfuração. Diferentes mecanismos de perfuração vêm sendo utilizados ao longo da evolução da atividade. O poço de Col. Drake, por exemplo, foi construído pela *Perfuração Percussiva*, na qual o avanço da etapa se deve ao impacto da coluna de perfuração no fundo do poço, sendo a mesma içada por um cabo (Fig.1).

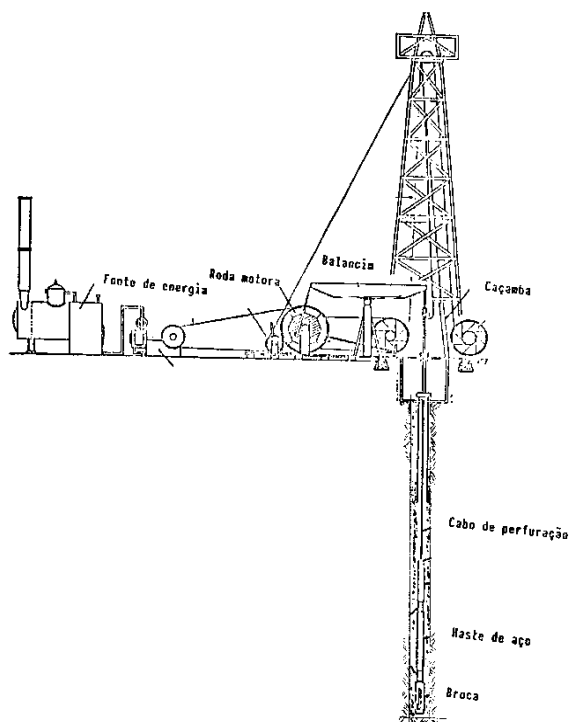


Figura 1 – Representação esquemática de sonda percussiva
(Fonte: <http://www.jcninspecoes.com.br/metodos/>)

2.1.2 Perfuração Rotativa

A utilização da perfuração percussiva se deu de maneira mais ampla até a década de 1930, a partir da qual, a *Perfuração Rotativa*, utilizada com sucesso primeiramente quando da descoberta do poço de *Lucas Spindletop* em 1901 no Texas, passou a ser dominante no cenário exploratório mundial. Atualmente, esse mecanismo permanece como o mais utilizado. Seu princípio de funcionamento baseia-se tanto na rotação da *Broca de Perfuração* – conectada à extremidade da coluna – quanto no *Peso Sobre Broca* aplicado, sendo ambos caracterizados como os principais agentes de destruição da rocha *in situ* (Fig.2).

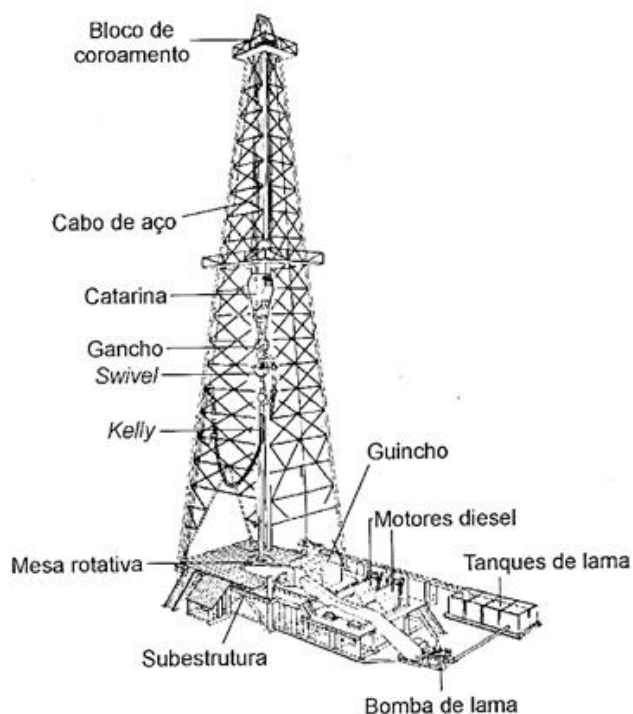


Figura 2 – Representação esquemática de uma sonda rotativa
(Fonte: <http://dc150.4shared.com/doc/VoVICBAZ/preview.html>)

2.1.3 Perfuração Percussiva Rotativa

Existe ainda um terceiro mecanismo de perfuração, o *Percussivo Rotativo*, o qual supostamente apresentaria a resposta para as maiores dificuldades encontradas pelos dois métodos anteriores [7], quais sejam: a baixa taxa de penetração e o excessivo desgaste de brocas na perfuração *Rotativa* de formações mais duras e abrasivas; e a baixa taxa de penetração em folhelhos e formações mais macias e a

baixa dirigibilidade (*steerability*) quando da perfuração *Percussiva*. Ao longo do trabalho será dada ênfase ao mecanismo de perfuração *Rotativa*.

2.2 Classificações e Tipos de Sondas Rotativas

Como citado anteriormente, o método padrão de perfuração atual é a perfuração rotativa, sendo a quase totalidade das operações desempenhadas por sondas rotativas. Podendo variar amplamente em tamanho, capacidade e ambiente de operação, nível de automação, a classificação das sondas rotativas dá-se basicamente a partir da natureza da operação, isto é, *onshore* ou *offshore*.

Sondas *onshore* (terrestres) podem ser subdivididas entre *Convencionais* e *Móveis*. As primeiras usam normalmente uma *Torre de Perfuração* montada no local e desmontada antes da mudança para a locação seguinte. Já as sondas terrestres móveis tendem a ser mais facilmente transportadas, por possuírem uma torre de perfuração transportável ou içável, a qual pode ser fixada ou retirada em peça única, diminuindo assim as operações de *rig-up* e *rig-down* (Fig.3). Geralmente, todos os componentes importantes à sonda são montados em módulos (*skids*) e podem ser facilmente transportados e reconectados.

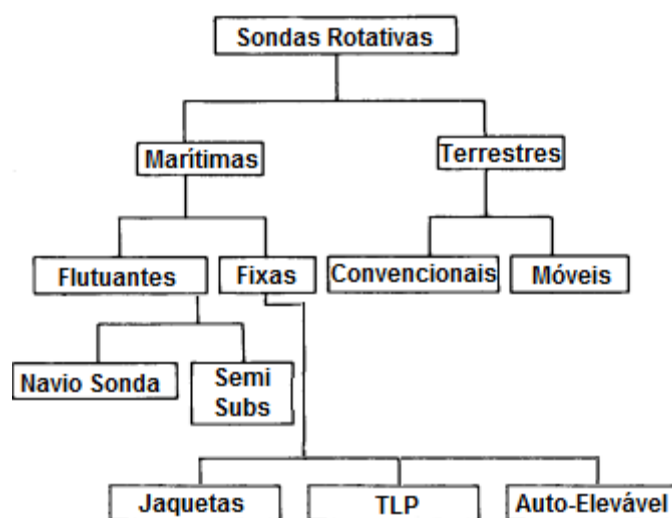


Figura 3 – Classificações e tipos de sondas de perfuração

A classificação das sondas *offshore* (marítimas) mais utilizadas pode ser realizada da seguinte forma:

- Plataformas *Fixas*: São utilizadas e lâminas d'água de até 300 metros. São constituídas geralmente de estruturas moduladas de aço instaladas no local

onde os poços serão perfurados. Além disso, o projeto das plataformas fixas contempla não só todos os equipamentos de perfuração, bem como os de estocagem de materiais, alojamentos de pessoal de sonda e, principalmente, os equipamentos e instalações necessários à produção dos poços (Fig.4).

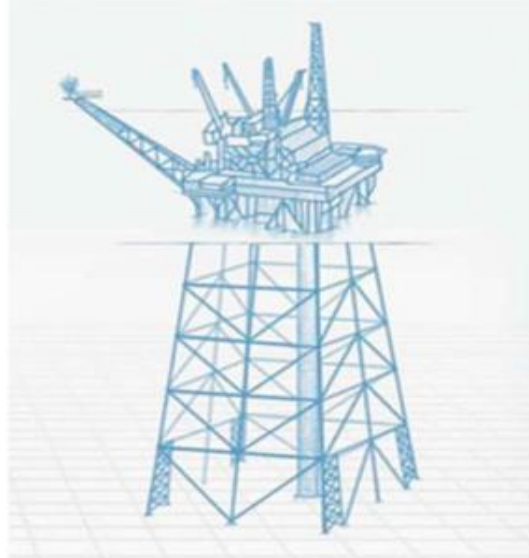


Figura 4 – Plataforma fixa típica [8]

- **Sondas *Auto-eleváveis*:** Também chamadas de *auto-elevatórias*, essas sondas são indicadas à perfuração de poços com lâminas d'água de até 130 metros. São estruturas constituídas basicamente de uma balsa acoplada a estruturas metálicas de apoio, ou pernas, as quais se movimentam para cima ou para baixo por acionamento mecânico ou hidráulico, de modo a preservar o casco da ação das ondas. A fixação das pernas no fundo do mar garante estabilidade à estrutura (Fig.5).



Figura 5 – Plataforma do tipo auto-elevável [8]

- Sondas *TLP* (*Tension Leg Platform*): Apresentam a estrutura de sondas *Semi-Submersíveis*, porém apresentando fixação ao assoalho marinho por meio de *tendões* – cabos metálicos tubulares. A flutuação da estrutura confere tração aos tendões, reduzindo significativamente a movimentação da sonda (Fig.6).



Figura 6 – Representação esquemática de uma plataforma TLP (Fonte: http://www-it.jwes.or.jp/weld_example_w_e.html)

- Sondas *Flutuantes*: Esse tipo de sonda pode ainda ser dividido em dois em dois subgrupos: Sondas *Semi-submersíveis* e *Navios-Sonda*. As primeiras são geralmente compostas de uma estrutura de dois ou mais conveses, apoiada por colunas em flutuadores submersos, enquanto os navios-sonda são projetados especialmente para a perfuração, atualmente. Uma característica em comum às sondas flutuantes é o posicionamento das mesmas, o qual pode ocorrer por meio de um sistema de ancoragem ou por um sistema de posicionamento dinâmico (Fig.7).



Figura 7 – Navio Sonda [8]

2.3 Sistemas de uma Sonda de Perfuração e Coluna de Perfuração

Os diferentes equipamentos utilizados na sonda ao longo de toda a etapa de perfuração são, em geral, agrupados por sistemas respectivos à sua função na sonda. Os seis tipos de sistemas são: *Sistema de Rotação*, *Sistema de Circulação de Fluidos*, *Sistema de Monitoração de Poços*, *Sistema de Geração e Transmissão de Energia*, *Sistema de Sustentação e Movimentação de Cargas* e *Sistema de Segurança e Controle de Poços* [8, 9]. Devido à natureza do trabalho e aos objetivos aos quais o mesmo se destina, será dado enfoque maior aos Sistemas de Rotação, Circulação de Fluidos e de Monitoração do Poço. Além disso, serão ainda apresentadas descrições de alguns componentes da coluna de perfuração e equipamentos de sonda, de modo facilitar o entendimento dos parâmetros monitorados pelo último sistema mencionado. Maior detalhamento dos outros sistemas poderá ser encontrado na literatura.

2.3.1 Sistema de Rotação

O Sistema de Rotação, como sugerido pelo nome, é responsável por transmitir rotação à coluna de perfuração, sendo constituído por três arranjos básicos de equipamentos. O primeiro e mais antigo deles é configurado pela associação do *Kelly* e a *Cabeça de Injeção*, além da associação do *Kelly* com a *Mesa Rotativa* por intermédio da *Bucha do Kelly* (Fig.8).

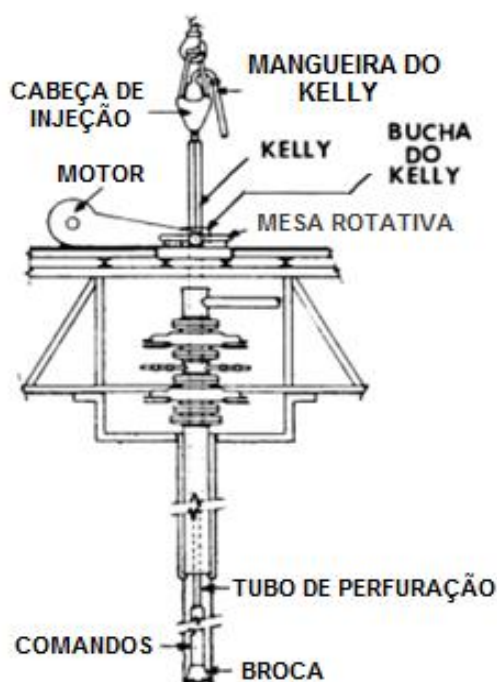


Figura 8 – Representação simplificada do Sistema de Rotação de sonda
(Adaptado de BOURGOYNE, A. T. J., MILLHEIM, K. K., CHENEVERT, M.E., YOUNG, F. S. J., 1991, *Applied Drilling Engineering*. 2nd printing, Richardson, Society of Petroleum Engineers)

O *Kelly* é constituído por uma haste metálica de seção quadrada ou hexagonal conectada ao topo da coluna de perfuração e é o elemento de transmissão de rotação à mesma. A *Mesa Rotativa* é o equipamento que transmite rotação ao *Kelly*, além de permitir seu livre deslizamento dado o aumento de profundidade do poço. A *Cabeça de Injeção*, por sua vez, é o elemento do sistema que permite a separação dos elementos rotativos daqueles estacionários na sonda, suportando ainda o peso da coluna de perfuração (Figs. 9, 10 e 11).

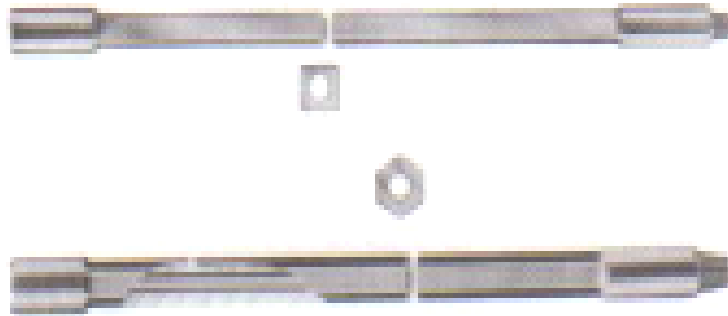


Figura 9 – Dois *kellys* de diferentes seções [9]



Figura 10 – Cabeça de Injeção [8]



Figura 11 – Mesa Rotativa [9]

O segundo arranjo de equipamentos do Sistema de Rotação é configurado pelo *Top Drive*, o qual elimina a necessidade de um *Kelly* e da *Mesa Rotativa* a partir da conexão de um motor ao topo da coluna. A vantagem do *Top Drive* é que ele permite a realização mais rápida da operação de *Manobra* – retirada ou descida da coluna de perfuração do poço – por possibilitar a movimentação de uma seção de três tubos de perfuração por vez, ao invés de somente um tubo, semelhante ao que ocorre quando da utilização de uma sonda com *Kelly* e *Mesa Rotativa*. Dessa forma, a perfuração com *Top Drive* permite economia no tempo gasto durante a perfuração das fases dos poços, além de prover mais potência para rotacionar a coluna e resposta rápida no caso de ocorrência de *kicks* [13] (Fig. 12).



Figura 12 – Top Drive [8]

O último dos arranjos de equipamentos utilizados em um Sistema de Rotação é o *Motor de Fundo*, colocado acima da broca e que pode ser um motor hidráulico de deslocamento positivo ou até mesmo turbina. Este equipamento é bastante utilizado na perfuração de formações mais duras com brocas impregnadas – a serem apresentadas posteriormente – e também em poços direcionais, nos quais o objetivo a ser atingido não se encontra sob a mesma vertical que passa pela sonda. O conceito físico por trás de seu funcionamento é o Princípio de Moineau, no qual a conversão da potência hidráulica é obtida a partir da passagem do fluido de perfuração por dentro da coluna em potência mecânica, propiciando a rotação a ser comunicada à broca. Basicamente, o motor de fundo pode ser caracterizado por um conjunto de pares – Estágios – Rotor/ Estator, que apresentam semelhança entre si em termos de *design*, porém com diferença no material utilizado em cada um dos elementos do par. O Rotor é a parte móvel do motor, sendo geralmente constituído por material metálico e encapsulado pelo Estator elastomérico, o qual representa a parte fixa do motor. O aumento do torque gerado por tal equipamento é diretamente proporcional ao número de palhetas por seção do Rotor/ Estator, sendo esse inversamente proporcional ao aumento da velocidade de rotação (RPM) (Fig.13).

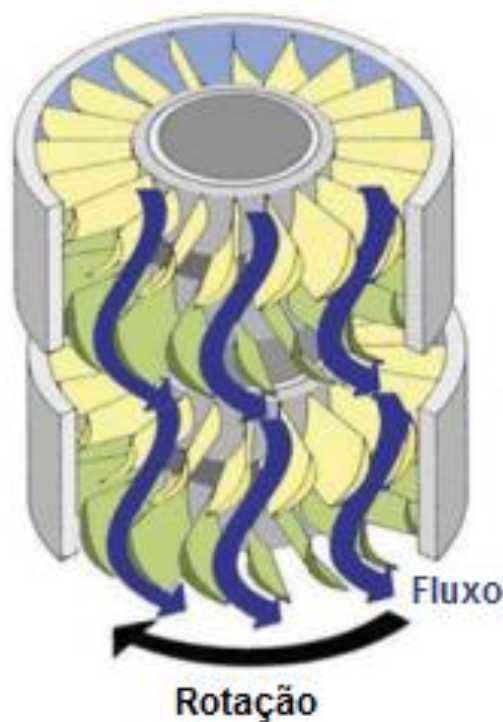


Figura 13 – Motor de fundo [8]

2.3.2 Sistema de Circulação de Fluidos

O Sistema de Circulação de Fluidos tem papel primordial na perfuração de poços. Sua importância reside nas múltiplas funções que desempenha: *Conferir pressão hidrostática ao poço; Depositar uma fina camada de reboco nas paredes do poço; Carrear os cascalhos para fora do poço; e Lubrificar e Refrigerar a Broca de Perfuração.* Os principais componentes do Sistema de Circulação da sonda incluem *Bombas de Lama, Tanques de Lama, Equipamento de Mistura de Lama e Equipamentos de Remoção de Contaminantes.* Dada a natureza do trabalho, será dada especial atenção ao sistema “poço-fluido”, representado esquematicamente pela figura abaixo (Fig.14).

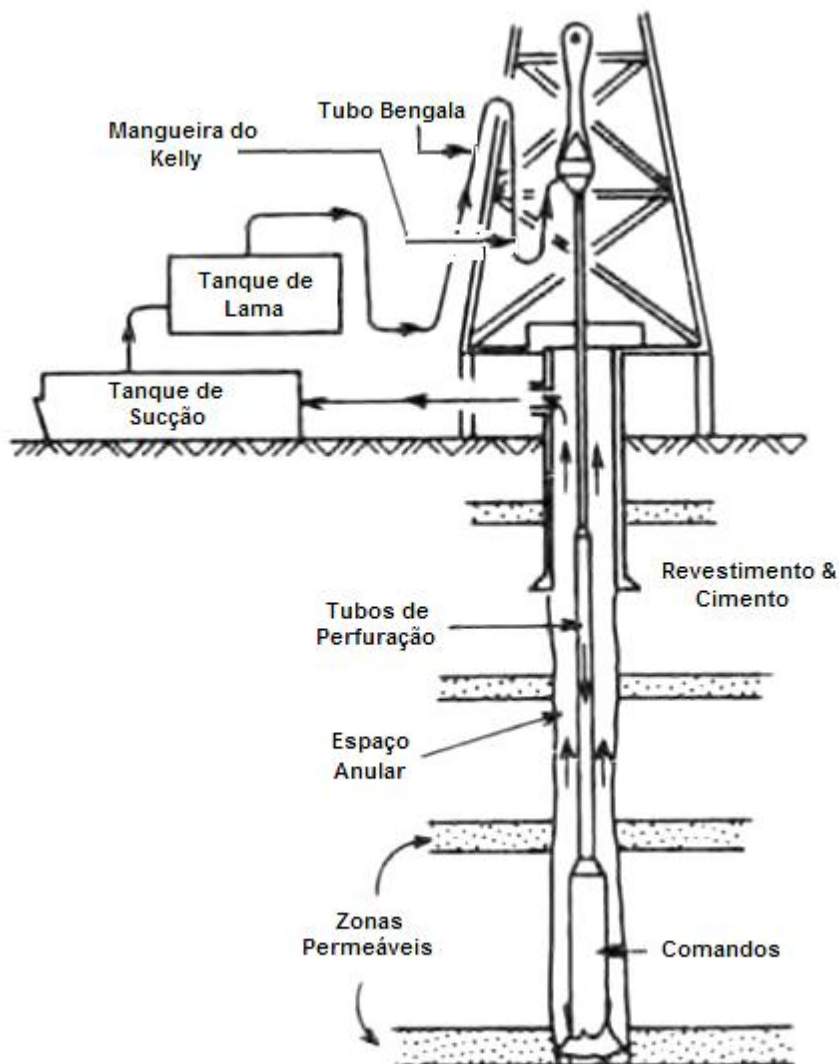


Figura 14 – O Sistema Poço-Fluido (Adaptado de BOURGOYNE, A. T. J., MILLHEIM, K. K., CHENEVERT, M.E., YOUNG, F. S. J., 1991, **Applied Drilling Engineering**. 2nd printing, Richardson, Society of Petroleum Engineers)

O início da análise do sistema “poço-fluido” se dá através das bombas de lama. Usualmente, são utilizadas bombas de deslocamento positivo dos tipos *Duplex* ou *Triplex*. A primeira configura a utilização de dois pistões de ação dupla, uma vez que os cursos de sucção e descarga acontecem nos dois sentidos de movimentação do pistão. Já as bombas *Triplex*, são bombas de três pistões de ação simples, sendo independentes os cursos de sucção e descarga. Da saída das bombas, o fluido então percorre um determinado circuito de tubulações até chegar ao *Tubo Bengala*, um tubo rígido de metal que conduz o fluido a alta pressão até aproximadamente um terço da altura da torre de perfuração. Em sua extremidade, o *Tubo Bengala* é conectado à *Mangueira do Kelly*, uma linha flexível de alta pressão que permite a chegada do fluido à *Cabeça de Injeção* (conectada à sua outra extremidade). A flexibilidade da *Mangueira do Kelly* permite a movimentação vertical do *Kelly* enquanto o fluido é bombeado por dentro da *Coluna de Perfuração*.

A figura 15 apresenta ainda uma representação esquemática simplificada da *Coluna de Perfuração* de um poço, cujo interior é percorrido pelo fluido de perfuração que está sendo bombeado. Ela é constituída, em maior parte, pelos *Tubos de Perfuração* e, na parte inferior, pelo *Arranjo de Fundo de Poço* – a toda futura referência ao *Arranjo de Fundo de Poço* no presente trabalho será utilizado o termo BHA. O BHA configura-se, da extremidade inferior em direção ao topo, pela *Broca de Perfuração*, ferramentas de *Medição e Perfilagem durante a Perfuração* (Measurements & Logging While Drilling - MWD & LWD) [11,12], por *Comandos*, responsáveis pela aplicação de peso sobre a *Broca*, a qual fica localizada na parte extremidade inferior da coluna e *Tubos de Perfuração Pesados*, utilizados de maneira a promover uma transição de rigidez entre os *Comandos* e os *Tubos de Perfuração*, aumentando assim a resistência à fadiga da *Coluna de Perfuração*. Maior detalhamento das funções dos equipamentos de M/LWD será dado na descrição do Sistema de Monitoração de Poço (Fig. 15).

A saída do fluido da *coluna de perfuração* se dá pelos *jatos da broca*, os quais podem ter diferentes diâmetros, além de suas disposições espaciais apresentarem configurações variadas. O objetivo dos *jatos da broca* é melhorar a ação de limpeza do fluido de perfuração no fundo do poço, a qual é maximizada a partir da determinação da *Força Hidráulica de Impacto* (JIF). Quando insuficiente, problemas como o *enceramento de broca* podem ocorrer, acarretando uma diminuição do ROP. Trata-se da adesão de cascalhos na broca, geralmente de formações pouco permeáveis ou impermeáveis, em razão da ausência parcial ou total de filtração do fluido de perfuração por esses cascalhos. O fluido começa então a fase de retorno do circuito

definido pelo sistema “poço-fluido”, a partir do fluxo pelo espaço anular do poço – determinado pela diferença entre o diâmetro do poço e o da *coluna* – carreando consigo os cascalhos e outras partículas sólidas geradas durante a perfuração, até chegar à superfície, onde será realizado seu tratamento para sua reutilização.

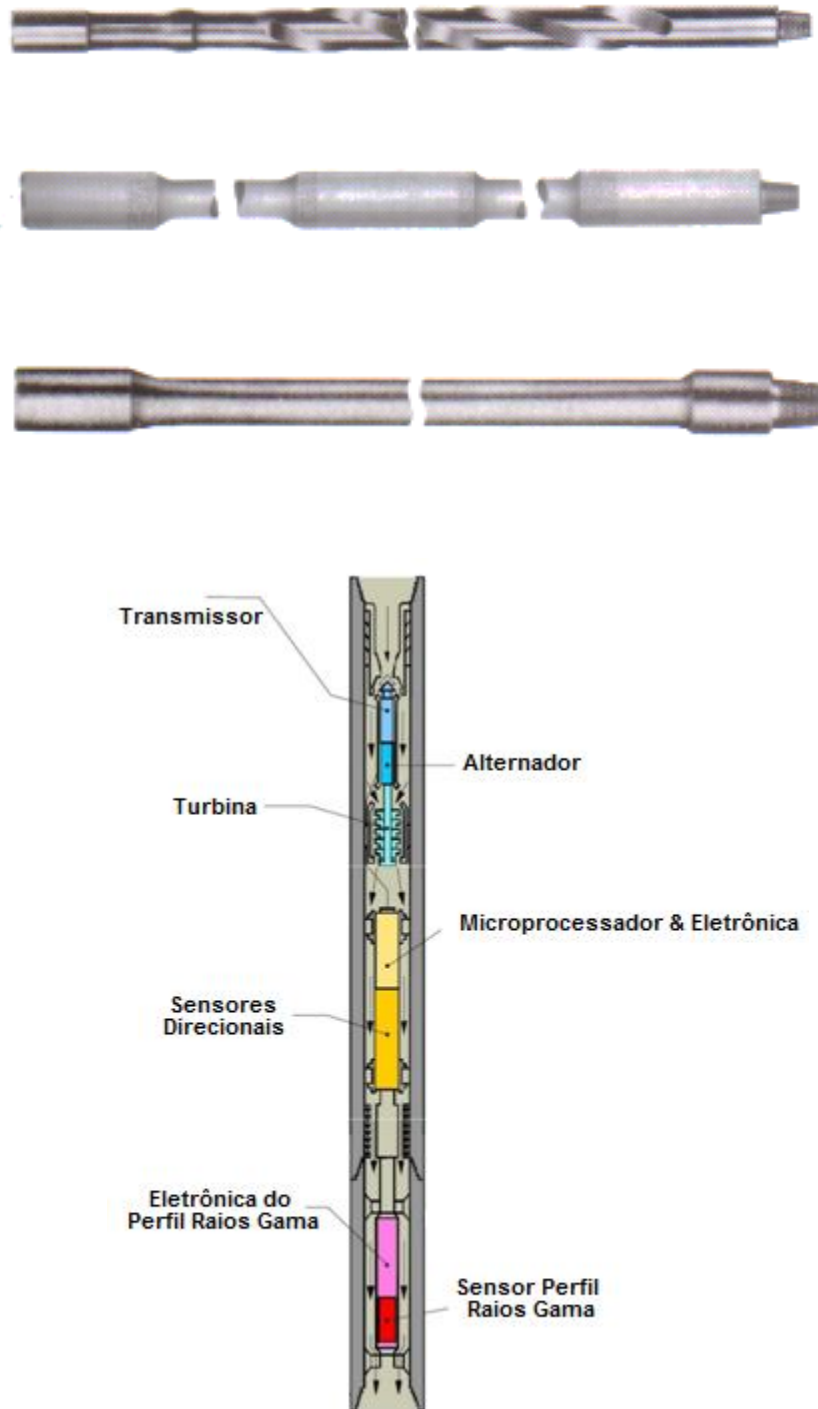


Figura 15 – Comandos, Tubos de Perfuração Pesados, Tubos de Perfuração e Ferramenta de M/LWD [9,12]

2.3.3 Sistema de Monitoração de Poços

O Sistema de Monitoração de Poços é constituído por equipamentos que fornecem dados relativos aos parâmetros necessários ao controle da operação de perfuração junto ao pessoal de sonda (Supervisor e Engenheiro de Perfuração, Engenheiro de Fluidos, Sondador, etc). Dentre os parâmetros mais importantes, podemos citar: *Profundidade de Poço*, *Peso sobre Broca*, *Carga no Gancho*, *Rotação da Coluna* (RPM), *Torque e Arrasto*, *Pressão de Bombeio*, *Vazão de Fluido*, *Vazão de Retorno de Fluido*, *Taxa de Penetração* e *Nível de Tanque de Lama* (fundamental para a verificação de indícios de *kicks*) (Fig. 16). A transmissão da informação se dá rotineiramente através de dois principais veículos, quais sejam: Equipamentos de M/LWD e *Mud Logging*.

Citado anteriormente na descrição de equipamentos da *coluna de perfuração*, as ferramentas de M/LWD são fisicamente localizadas na parte inferior da mesma (BHA), alguns metros acima da broca. O equipamento de MWD é responsável pela avaliação de propriedades físicas do fundo de poço durante a perfuração. Em geral, Pressão, Temperatura, Trajetória do Poço – com a determinação da angulação do poço e de seu azimute – Torque e Arrasto da Coluna, além da Vibração e do Peso sobre a Broca são os parâmetros medidos. Por sua vez, a ferramenta de LWD é utilizada para medir parâmetros das formações rochosas, tais como: a *pressão de poros* a uma determinada profundidade – permitindo assim a análise de uma maior probabilidade de zonas anormalmente pressurizadas; a *composição das rochas* através do perfil de Raios Gama; a *densidade*, bem como a *composição, dos fluidos* no interior das formações através dos perfis de Emissão de Nêutrons e Resistividade; a *porosidade* e o *grau de compactação das rochas* através do perfil Sônico; entre outros. O envio dessas informações é realizado por meio de pulsos de fluido de perfuração, os quais são detectados por um aparelho de medição e transformados em um sinal eletrônico. Este sinal é processado e apresentado em forma numérica nas telas do Sistema de Monitoração da sonda. A combinação dos resultados dos diferentes perfis proporciona uma melhor inferência das propriedades das rochas e, por conseguinte, uma melhor avaliação do intervalo de interesse. A fig. 15 ilustra também uma ferramenta de M/LWD.

Outro importante veículo de monitoração na superfície é o *Mud Logging*. Ele consiste na análise do fluido de perfuração que retorna à superfície, sob a ótica das propriedades das partículas carregadas pelo fluido e coletadas na sonda. Um dos

aparelhos utilizados nessa análise é o *cromatógrafo*, o qual é responsável pela identificação de diferentes compostos presentes no fluido e, principalmente, pela detecção de hidrocarbonetos incorporados à mistura. Além disso, são ainda realizadas investigações sobre as *amostras de calha* – partículas maiores de fragmentos de rocha – que chegam à sonda. Tal procedimento auxilia a inferência de propriedades petrofísicas, tais como a densidade, porosidade e permeabilidade da formação, além do tipo de litologia e das feições geológicas da rocha.



Figura 16 – Unidade de monitoração de parâmetros e tela com apresentação dos parâmetros [12]

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM O ROP

3.1 Introdução

O estudo do comportamento rochoso em condições de poço teve grande desenvolvimento a partir da década de 1950. Muitos autores, a partir da observação de que a perfurabilidade, isto é, o grau de facilidade de perfuração da rocha, e consequentemente o ROP, diminuem com o aumento da profundidade, iniciaram investigações acerca dos principais fatores responsáveis por este fenômeno.

3.2 Cuninngham & Murray, 1955

Cunningham & Murray [13] inicia sua pesquisa a partir da comparação do ROP obtido em condições atmosféricas (em seus experimentos em laboratório) com o ROP registrado em condições de campo para uma mesma rocha. Em seus ensaios de perfuração em células de pressão com utilização de microbrocas (1 ¼" de diâmetro) e amostras cilíndricas (3 ½" de diâmetro x 3 ½" de comprimento) de um dado tipo de folhelho, ele constata a diferença de uma ordem de grandeza entre as taxas de penetração atmosférica e de campo.

Primeiramente, o autor verifica a influência das tensões confinantes, as quais são atreladas ao grau de compactação da formação rochosa. Como esperado, houve uma redução da taxa de penetração com o aumento das tensões (Fig.17A). A pesquisa do autor prossegue com a verificação das relações do ROP com outros fatores, passando então a analisar seu comportamento como função do *Peso sobre Broca* (WOB) tendo as tensões confinantes como parâmetro controlado. Uma análise qualitativa dos resultados obtidos infere uma relação de aumento do ROP com o aumento do WOB (Fig.17B).

Durante a realização de seus experimentos, Cunningham registrou dados de amostras cujo ROP não foi sensibilizado pelo efeito das tensões confinantes. Assim, foi proposta pelo autor a análise da permeabilidade das rochas como um dos fatores determinantes quanto a variação do ROP. Em testes de compressão, as amostras de folhelhos (impermeáveis) comportaram-se como cilindros de rocha revestidos, de modo que a tensão compressiva diferencial necessária para a falha da amostra elevava-se com o aumento da tensão confinante. No caso de rochas permeáveis, as amostras foram saturadas com fluido e expostas à tensão confinante, de modo que a

pressão da formação foi assumida como igual à tensão confinante. Para esse tipo de rochas, a tensão compressiva diferencial de fratura não foi afetada pelo aumento da tensão confinante. A hipótese formulada para a explicação desse fenômeno seria, então, a percolação do fluido de perfuração pelos interstícios da formação, de modo que a pressão em seu interior se equalizaria a pressão da coluna hidrostática. Quando da utilização de água como fluido, não houve qualquer aumento do diferencial de pressão entre a hidrostática de fluido e a de poros, enquanto com a utilização de fluido com baixa perda de água houve acúmulo de *reboco* na parede do poço. É exatamente esse *reboco* apontado como responsável pela diminuição do ROP das amostras de rochas permeáveis testadas.

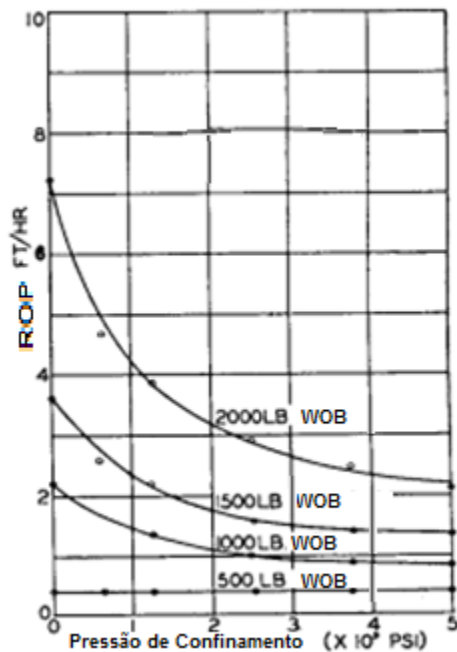


Figura 17A – ROP vs Pressão de Confinamento (Adaptado de [13])

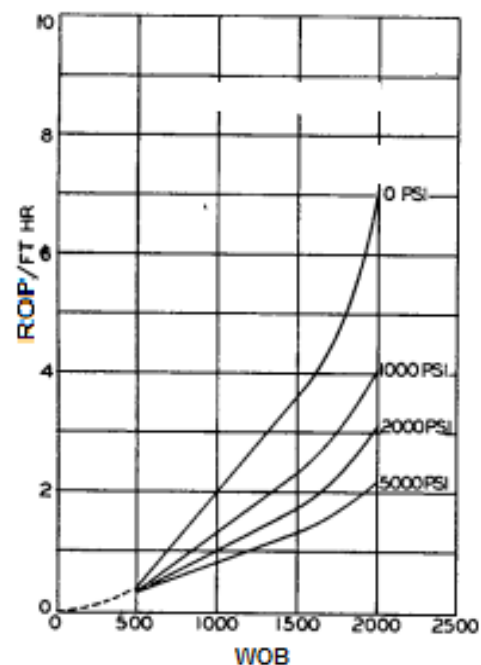


Figura 17B – ROP vs WOB com a Pressão de Confinamento como parâmetro (Adaptado de [13])

3.3 Eckel, 1957

Dois anos mais tarde, Eckel [14] realizou um estudo baseado na pesquisa de Cunningham [14], no qual investigou primeiramente o efeito da pressão da formação, ou pressão de poros, sobre a taxa de penetração da broca mantendo-se WOB, RPM e vazão de fluido (GPM) constante, além de outros parâmetros, como a tensão

confinante e a pressão hidrostática. Os resultados obtidos por Eckel confirmam aqueles de Cunningham para a pressão hidrostática maior que a pressão de poros, uma vez que houve indicação da redução no ROP para essa situação. Os resultados experimentais mostram ainda que os maiores valores da taxa de penetração ocorreram quando os valores de pressão de poros e hidrostática se equipararam. Na segunda parte de sua investigação, Eckel ateu-se à tentativa de explicação da mecânica pela qual se desenvolvem os efeitos de pressão no ROP. Analisando cortes de secções transversais das amostras de rochas utilizadas em seus experimentos, o autor relata que para condições constantes de WOB, RPM e GPM, tensão confinante igual à pressão hidrostática (3000 psi) e variando-se a magnitude da pressão de poros de forma que o diferencial de pressão fosse nulo ou igual exatamente ao valor da pressão hidrostática, observou-se um fato interessante: para diferenciais de pressão não nulos, a rocha se torna mais plástica. O fenômeno “plastificante” da parede do poço acontece concomitantemente à perfuração e, o mais importante, não se trata tão somente da adesão de uma camada de fragmentos de rocha à parede, uma vez que não é constatada nenhuma alteração das características de regiões da amostra perfuradas com diferencial de pressão nulo quando da aplicação de um não nulo para a continuação de testes ainda na mesma amostra. Ou seja, as seções perfuradas com diferencial nulo, anteriores àquelas perfuradas com diferencial de pressão da ordem de 3000 psi, mantiveram a superfície de parede inalterada, enquanto as últimas apresentam nitidamente a modificação plastificante resultante (Fig.18).

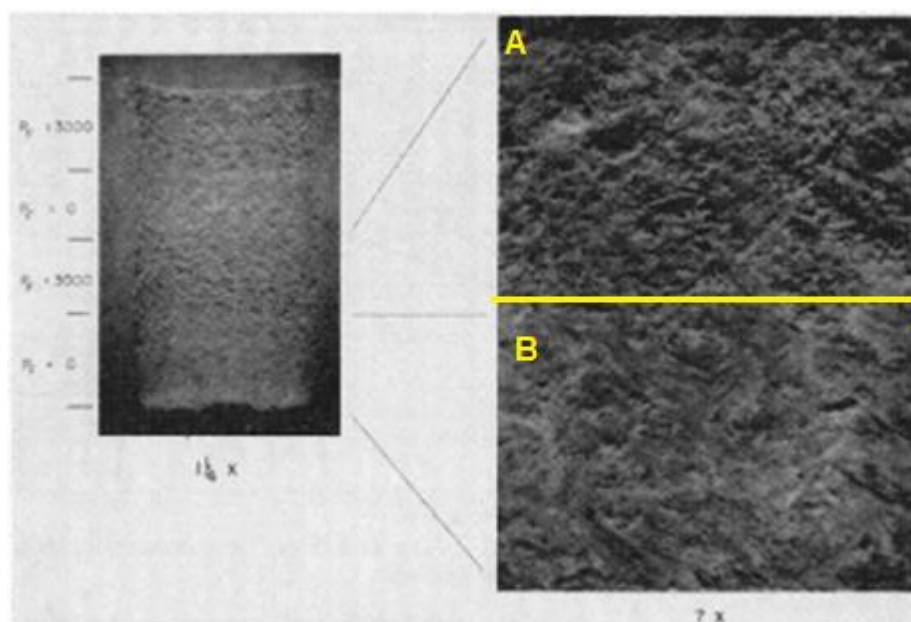


Figura 18 – Regiões distintas do corpo de prova: A – Não Plastificada & B – Plastificada
[14]

Dois outros importantes trabalhos, ambos publicados em 1959, possuem significativo destaque na literatura, uma vez que a partir de investigações independentes chegaram a resultados extremamente próximos. O primeiro deles tem a participação de Cunningham [15] uma vez mais, enquanto o trabalho de Van Lingen [16] apresenta um conceito de *retenção dinâmica de cascalhos*, o qual complementa os resultados obtidos por Cunningham [15] em relação ao comportamento do ROP em função da permeabilidade das rochas, da velocidade de rotação e do tipo de broca.

3.4 Cunningham & Eenik, 1959

Em seu trabalho, Cunningham & Eenik [15] têm como foco o estudo de formações permeáveis. Pela primeira vez são obtidos dados relativos a um diferencial de pressão negativo, isto é, quando a pressão de poros é maior que a pressão hidrostática no interior do poço. Assim como constatado em situações de ocorrência de *kicks* e operações de *underbalance*, o efeito resultante é o aumento do ROP. A hipótese levantada é de que para essa situação, na qual há um fluxo de fluido da formação para o interior do poço, existe um “auxílio” da formação quanto ao carregamento de cascalhos, prevenindo também a formação do *reboco* na parede do poço.

A partir de um determinado diferencial de pressão, há grande resistência à comunicação das pressões. Tal fenômeno é atribuído à presença de *reboco*, o qual serve como uma espécie de “trapa” para os fragmentos de rocha no fundo do poço. Essa combinação entre o *reboco* e os cascalhos serve como um amortecedor entre a broca e a formação intacta, reduzindo a efetividade de ação da mesma. Com isso, a influência da limpeza de fundo de poço passa a ganhar importância quando da análise da rápida queda do ROP em rochas permeáveis, mesmo quando o fluido circulado é água (Fig.19). Esse destaque é motivado pela observação originada nos testes de amostras de tipo de dolomita na presença desse fluido. Ainda que apresentasse permeabilidade suficiente para possibilitar a percolação da água em seu interior, a ação dos dentes da broca comprimindo a formação em seus próprios poros formou um *reboco* eficiente, de modo que o fluido não mais passava facilmente pelos interstícios da rocha. Como resultado, a resistência à comunicação das pressões por razão da presença do *reboco* passou a ser mais influente na diminuição do ROP à medida que se aumentava o diferencial de pressão. Dessa forma, foram feitos testes com

diferentes velocidades de jatos de broca, nos quais se apresentou melhoria do ROP com o aumento dessa variável para um valor constante do diferencial de pressão.

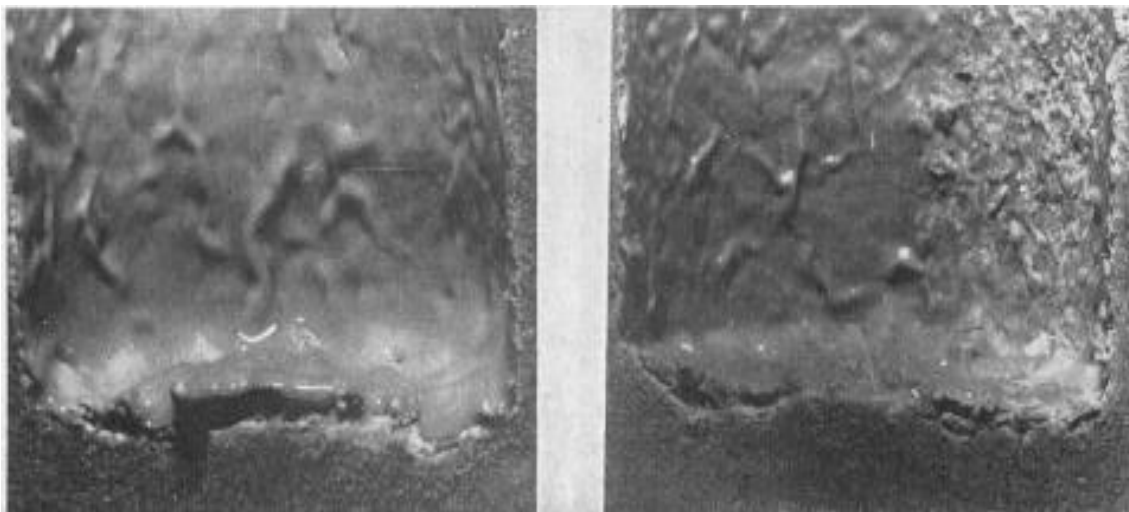


Figura 19 – Reboco e acúmulo de cascalhos no fundo do poço [16].

O autor discorre ainda acerca dos efeitos de permeabilidades sobre a taxa de penetração. Segundo ele, formações de alta permeabilidade permitem um movimento de fluidos interno relativamente livre, além de possuírem magnitude maior que a permeabilidade do *reboco*. Com isso, o diferencial de pressão entre a coluna de lama e a pressão da formação quando do *overbalance*, seria não só atuante no *reboco*, como principalmente configuraria o mecanismo pelo qual a restauração do próprio *reboco* ocorre. Isso se deve ao fato de que o avanço da perfuração resulta da penetração dos dentes da broca na camada amortecedora depositada. Esta, por sua vez, dificulta a retirada do fragmento de rocha formado, mantendo-o no fundo do poço. Com a restituição do *reboco* a partir da retirada do dente da broca (em função de sua rotação), a ação de corte da broca vai progressivamente se restringindo à camada amortecedora de cascalhos. Novamente, é proposto como solução para tal fenômeno o uso adequado de jatos, que limpariam o fundo do poço, reduzindo a espessura do reboco e permitindo o acesso a formação virgem à broca.

3.5 Van Lingen & Garnier, 1959

Assim como Cunningham & Eenik [15], Van Lingen & Garnier [16] também realizam experimentos com diferenciais de pressão variados. Seguindo a linha de pesquisa do aumento da resistência à compressão da rocha com o aumento da

profundidade, Van Lingen & Garnier promovem primeiramente experimentos com valores idênticos de tensão confinante, pressão hidrostática de fluido e pressão de poros. Mais uma vez, os resultados apontam uma diminuição no ROP com o aumento da pressão, além de mostrarem que uso de um fluido diferente de água resulta em decréscimo da taxa de penetração também para rochas de maior permeabilidade. Contudo, tal efeito se manifesta apenas até uma dada pressão. A partir desse valor, o ROP não mais é afetado e mantém-se constante (Fig.20).

Para o caso onde a pressão hidrostática de fluido é igual à pressão de poros, a explicação para a redução do ROP percentual – razão entre o obtido em condições de poço e aquele em condições atmosféricas – não pode ser oriunda do aumento de resistência à compressão da rocha, tampouco de uma força de pressão estática orientada para baixo, uma vez que o diferencial de pressão estático é nulo. Assim, segundo o autor, uma força de mesma orientação, porém de origem dinâmica pode surgir do processo de remoção de cascalho. A hipótese formulada seria de que quando um fragmento de rocha é formado, uma condição de vácuo completo – *full vacuum* – é criada abaixo dele, a não ser que haja alimentação de fluido suficiente para a abertura das fendas que o limitam, seja daquele advindo do poço ou da formação. Haveria, então, três diferentes mecanismos de alimentação de fluido: *a partir do fluido de perfuração, a partir do filtrado de fluido através do fragmento, e a partir de fluxo de fluido dos poros da formação rochosa.*

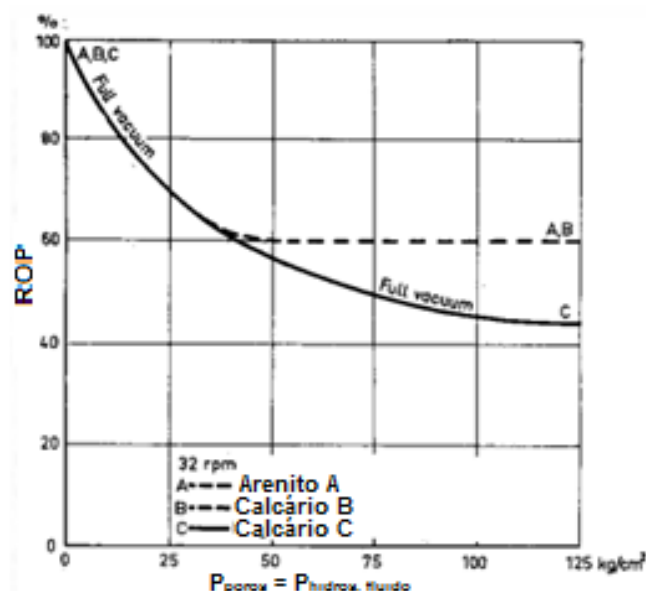


Figura 20 – ROP vs Pressão de fluido constante [17]

O primeiro mecanismo encontra, inicialmente, resistência infinita dada à largura inicial das fendas igual a zero. O segundo mecanismo é afetado, principalmente, quando da utilização de fluido de perfuração convencional. Por razão do efeito

plastificante das partículas de aditivos em suspensão na mistura, a permeabilidade do fragmento rochoso vai sendo diminuída, reduzindo assim o fluxo necessário para a abertura das fendas. Dessa forma, o terceiro mecanismo (fluido da formação) será o principal para rochas permeáveis quando do uso de lama com efetivo efeito plastificante.

Para o caso de rochas quase impermeáveis não há qualquer suprimento de líquido para a abertura das fendas, de modo que o vácuo completo é formado abaixo do fragmento rochoso. Não obstante a ausência da diferença entre a pressão da coluna de fluido e a pressão de poros, isto é, uma vez que a permeabilidade dessas rochas não permite a comunicação da pressão de poros à região abaixo do fragmento, a força do diferencial de pressão se torna então igual à totalidade da pressão da coluna de fluido acima do fragmento, sendo o cascalho retido no fundo do poço. Isso poderia explicar a redução no ROP das rochas pouco permeáveis e impermeáveis. Contudo, no caso de rochas permeáveis, a condição de vácuo completo abaixo do fragmento rochoso ocorre quando de baixos níveis de pressão, o que não possibilita a alimentação de fluido para a abertura das fendas, mantendo o fragmento retido e diminuindo o ROP. Entretanto, quando a pressão de poros atinge um determinado patamar, o diferencial de pressão entre esse valor e o valor da pressão na região abaixo do fragmento é suficiente para alimentar as fendas com o fluido da formação. Para maiores níveis de pressão de poros esse patamar específico é mantido constante, fixando-se as condições de WOB e RPM (Fig. 20).

A partir de dados de experimentos para brocas tipo draga de 1 ¼", o autor indica ainda a possibilidade do suprimento de líquido para a região abaixo do fragmento rochoso como função da velocidade de raspagem da broca. Para experimentos com fluido de perfuração convencional em amostras de calcário Vaurion com RPM fixo, foi necessário um determinado limiar de diferencial de pressão para a manutenção da abertura das fendas criadas. Era esperado que quanto maior a velocidade de rotação da broca, maior seria a velocidade de remoção de cascalho e, conseqüentemente, maior a vazão de fluido de perfuração, aumentando possivelmente o diferencial de pressão necessário para tanto. A Fig. 21 mostra, para amostras de calcário Vaurion com WOB e as pressões hidrostática e de poros iguais e constantes, como o ROP percentual varia com o RPM. O gráfico mostra exatamente a confirmação da hipótese anterior, demonstrando que assim como houve redução do ROP quando do aumento do diferencial de pressão estático, houve também redução da taxa de penetração com o aumento do RPM e do diferencial de pressão *dinâmico*, tendo o ROP atingido um valor constante a partir da velocidade de 130 rpm. Possivelmente, acima dessa velocidade, uma condição de vácuo completo pode ter sido alcançada.

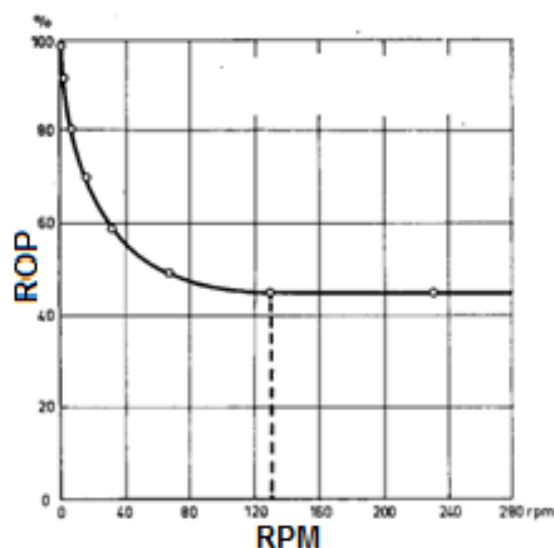


Figura 21 – ROP vs RPM com pressão de poros constante e igual à hidrostática de fluido [16]

Na tentativa de aproximar as condições do experimento com as de campo, a pressão de poros foi regulada como sendo menor do que a da coluna de fluido, o que permitiu a constatação de redução ainda maior do ROP. Por razão da atuação do *mud cake* nesse tipo de configuração, a resistência à compressão das amostras de rocha experimentadas foi modelada de maneira linear, igual ao limiar compressivo para pressão atmosférica mais cinco vezes o valor da tensão confinante efetiva. Para que esse aumento na resistência da rocha fosse incorporado, foi estabelecida uma relação entre o ROP e o WOB para brocas tipo draga de 1 1/4" de diâmetro. Através dessa relação, o autor calculou a resistência à compressão da rocha em condições específicas de operação do experimento realizado. Analisando os resultados da fig. 22 – a qual apresenta o gráfico do percentual de ROP (tanto o registrado experimentalmente quanto o devido ao aumento da resistência à compressão da rocha) pela pressão de coluna de fluido – fica clara a contribuição de mais um fator para a redução do ROP, que não somente o aumento da resistência à compressão da rocha. Agora, o diferencial de pressão estático se manifesta, mantendo os fragmentos de rocha recém-formados presos ao fundo do poço, diminuindo assim o ROP.

A fig.23 apresenta outra projeção do ROP como função da pressão da coluna de fluido. Entretanto, a taxa de penetração é representada como percentual do valor esperado para o ROP quando da consideração exclusiva do efeito de aumento de resistência da rocha. Constata-se que a curva resultante coincide com a curva de ROP percentual para diferencial de pressão estático nulo (fig.22), indicando assim uma coincidência dos efeitos de retenção dos fragmentos rochosos no fundo do poço. Dessa forma o autor conclui que a redução do ROP devido à diferença de pressão

através de um fragmento de rocha já formado é a mesma para todos os tipos de rochas examinadas, seja sua origem estática ou dinâmica. Isso sugere que a pressão diferencial através do fragmento terá origem mista se a pressão de poros for maior que a atmosférica e menor que a da coluna de fluido, e será a pressão diferencial total quem realmente afetará a retenção do fragmento no fundo do poço.

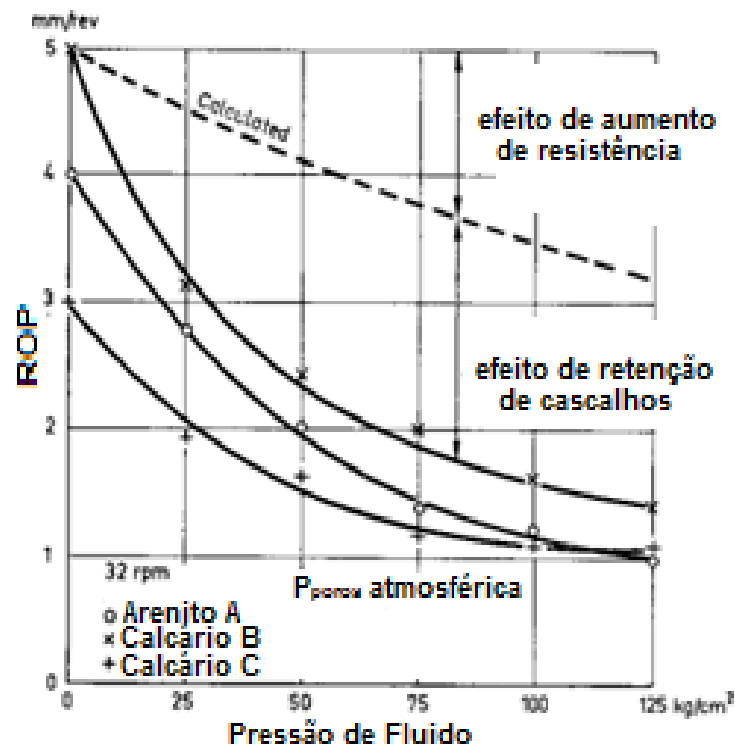


Figura 22 – ROP (%) vs Pressão de Fluido [16]

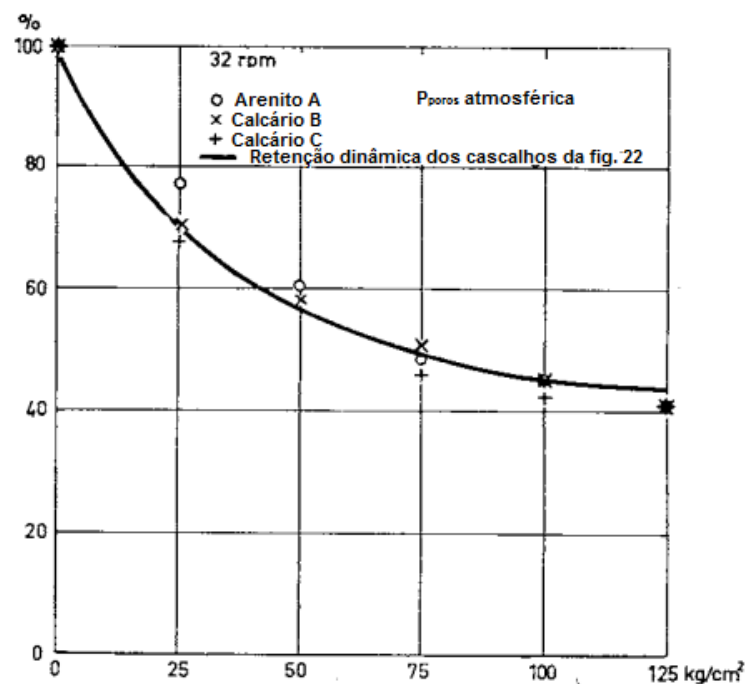


Figura 23 – Comparação dos efeitos de retenção estáticos e dinâmicos [16]

O próximo passo da investigação dos efeitos da pressão no ROP foi a verificação da influência da pressão confinante efetiva sobre o mesmo. Os experimentos realizados mostram a manutenção dos valores da taxa com a variação da pressão confinante, de forma que no caso de simetria rotacional dessa tensão, o aumento da resistência da rocha na região de contato com a broca é inteiramente governado pela diferencial de pressão do fluido de perfuração e a de poros. Além disso, os experimentos realizados com variação dessas pressões apontam para o aumento do torque (T) quando do decréscimo do ROP.

3.6 Teale, 1965

Seguindo a abordagem teórica de Simon [17], Teale [18] desenvolve um estudo acerca das relações energéticas entre as propriedades de rochas e os fragmentos resultantes da ação da broca, e do balanço de energia de operações de perfuração. Surge assim a formulação da teoria da *Energia Mecânica Específica* (MSE), a qual configura o trabalho realizado para a escavação de uma unidade de volume rochoso. Esse conceito é a base de uma das linhas encontradas na literatura para a modelagem das atividades de perfuração. O autor indica que o processo de perfuração real pode ou não alcançar o mínimo gasto energético necessário e a diferença entre a exigência energética real e teórica poderia servir de indicador da eficiência com a qual o processo ocorre, sendo como exemplo citados o recorte contínuo de cascalhos já formados no fundo do poço e o atrito entre as ferramentas na coluna e a rocha.

Quantitativamente, Teale define a energia específica como função da força longitudinal aplicada, isto é, o WOB, e do torque resultante do movimento de rotação da coluna, chegando assim à Eq.1:

$$e = \left(\frac{F}{A}\right) + \left(\frac{120\pi}{A}\right)\left(\frac{NT}{u}\right) \quad (1)$$

Equação 1 – Definição de Energia Mecânica Específica

onde:

e = energia específica ((pol lbf / pol³); F = WOB (lbf); A = área da broca (pol²); N = velocidade de rotação (rpm); T = Torque na broca (ft-lbf); e u = ROP (ft/hr). Vale ressaltar o fato de que a energia específica tem dimensão de tensão (lbf / pol²). Em

seu trabalho, Teale também realizou experimentos com amostras rochosas, tendo observado alguns resultados interessantes.

É observado, ao longo dos testes realizados, o aumento do valor da energia específica em situações de baixo peso sobre broca. Segundo ele, abaixo de um determinado limiar, o WOB será insuficiente para a efetiva penetração da broca. O volume rochoso escavado será muito pequeno havendo, entretanto, a realização de uma quantidade finita de trabalho mecânico da coluna de perfuração, a qual acaba sendo destinada ao atrito. Assim, no caso hipotético de WOB nulo, a MSE tende ao infinito. À medida que o WOB é aumentado, a energia é canalizada para a efetiva escavação da rocha, de modo que a energia destinada ao atrito vai rapidamente diminuindo, acontecendo o mesmo com a MSE total. Contudo, tal queda não é indefinida por força da existência de um patamar energético mínimo, cujo alcance determina também a obtenção da máxima eficiência mecânica para as condições de operação utilizadas. Além disso, seus experimentos apresentam certa correlação entre a energia específica e a resistência à compressão da rocha, o que o leva a analisar o processo de perfuração pela ótica da indentação, chegando à conclusão de que de fato há uma afinidade entre esses dois parâmetros. Entretanto, é feita a ressalva de que a MSE não pode ser representada por um único número, uma vez que o processo de perfuração é caracterizado por grandes flutuações de variáveis como o próprio WOB, RPM, Torque, entre outras.

3.7 Pessier & Fear, 1992

Pessier & Fear [19] conduziram testes em simuladores em escala real para desenvolver e validar um modelo de perfuração baseado exatamente na teoria proposta por Teale [18].

Inicialmente, é estabelecida uma relação do torque como função de parâmetros medidos na sonda, como ROP, WOB e N. Para tanto, é introduzida uma nova variável, o *coeficiente de atrito específico* (μ), necessário para, em última análise, o cálculo da MSE quando da impossibilidade de obtenção de dados de MWD para o torque. A relação é apresentada a seguir, na equação 2.

$$T = \mu \frac{D_B WOB}{36}$$

Equação 2 – Torque como função do coeficiente de atrito específico

onde D_B é o diâmetro da broca, em polegadas.

A equação 3 se refere à expressão utilizada pelos autores para o cálculo do ROP em função da MSE mínima (MSE_{MIN}) e da eficiência mecânica percentual (EFF_M) e do torque, sendo esse substituído pela relação da eq. 2.

$$ROP = \frac{13,33 \mu N}{D_B \left(\frac{MSE_{MIN}}{EFF_M WOB} - \frac{1}{A_B} \right)}$$

Equação 3 – Descrição do ROP em função da MSE

onde A_B é a área da broca, em pol^2 e:

$$EFF_M = \frac{MSE_{MIN}}{MSE}$$

Equação 4 – Definição da Eficiência Mecânica em função da MSE

Os testes com amostras de folhelho e argamassa (material de controle) foram executados com ROP, WOB, RPM e hidráulica de broca constantes. A partir dos registros dessas variáveis, a MSE, a EFF_M e μ foram computados. Os resultados indicam que em uma situação de pressão atmosférica, a MSE do folhelho é um pouco menor em relação à da argamassa graças à pequena diferença entre a resistência à compressão das duas rochas, sendo os valores de μ 10% a 20% maiores. Entretanto, para situações nas quais existe pressão hidrostática, as características de fundo de poço mudam dramaticamente. Apesar de apontarem valores similares aos de μ em condição atmosférica, os valores da MSE para argamassa aumentaram 100%. Assim, os autores corroboram a teoria previamente desenvolvida [13 – 16], uma vez que indica a atuação de dois fenômenos como responsáveis por tal alteração das propriedades rochosas: o aumento da resistência da rocha sob ação de estados de tensão diferentes do atmosférico e uma queda de eficiência mecânica.

Tal queda é ainda mais significativa quando observados os testes com folhelho impermeável utilizado para os testes. Os dois problemas apontados como responsáveis por essa queda são o *enceramento da broca* e a *retenção dinâmica de cascalhos* – ou, como Van Lingen [20] denomina, *enceramento de fundo de poço* – fruto da atuação do diferencial de pressão dinâmico [16] (Figs. 24 e 25). É sugerida, portanto, a determinação da influência da seleção do tipo e hidráulica de broca, além das práticas adotadas, sobre a eficiência do processo de perfuração.



Figura 25 – Broca TCI encerrada [19]

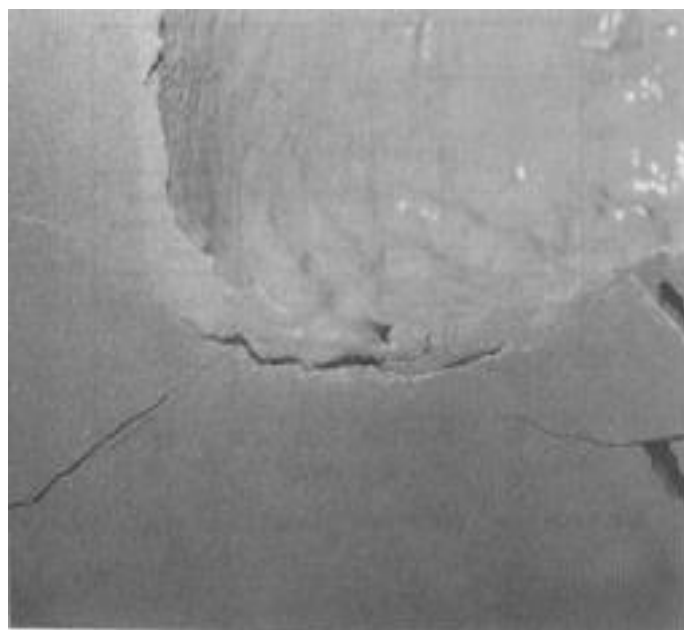


Figura 24 – Enceramento de fundo de poço [19]

A investigação da influência dos tipos de broca é iniciada com a análise dos resultados de experimentos realizados com brocas tricônicas. Evidencia-se maior desgaste dos dentes de brocas de dentes de aço (ST) quando comparadas ao desgaste de brocas de inserto de carbeto de tungstênio (TCI), apesar de a eficiência mecânica obtida ter sido 50% maior para o primeiro grupo. Além disso, o fenômeno de enceramento ocorre em ambas as estruturas (Figs 25 e 26), sendo maior em brocas TCI.

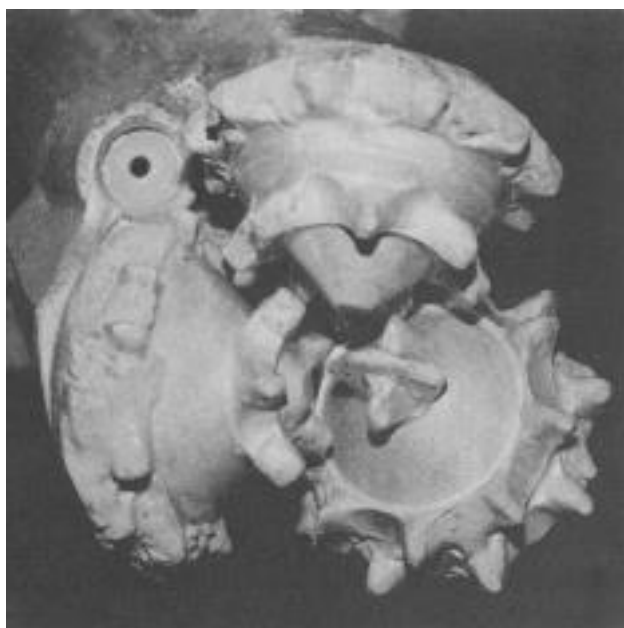


Figura 26 – Enceramento típico de broca ST [19]

Quando do tratamento das informações colhidas nos experimentos com brocas PDC, observa-se uma diferença significativa no coeficiente de atrito específico (μ), o qual assume valores de 3 a 5 vezes maiores que os obtidos para as brocas tricônicas analisadas. Isso significa, segundo os autores, que as brocas PDC podem perfurar com muito menos WOB aplicado, ou ainda, muito mais rapidamente se aplicadas as mesmas cargas das brocas tricônicas. Entretanto, o torque obtido para a broca PDC foi maior do que o registrado para o outro tipo de brocas analisado, sendo esse o fator responsável pela limitação da eficiência mecânica desses testes. Os autores sugerem ainda vantagens e desvantagens da utilização de brocas PDC para diferentes tipos de litologia, sendo os melhores resultados obtidos em formações menos abrasivas e de dureza média, como folhelhos e calcários.

Somado à anterior análise da influência dos diferentes tipos de broca, pôs-se em prática alguns testes objetivando a verificação da relação entre a estrutura de corte, seu desgaste e o ROP, por intermédio da aferição da MSE e da EFF_M . Segundo os autores, os efeitos de encerramento de broca e de fundo de poço foram maiores em brocas desgastadas. Além disso, o desgaste de rolamentos e selos das brocas tricônicas, apontados como modo de desgaste mais crítico para esse tipo de broca. Foi realizado um teste com duas brocas TCI em iguais condições de operação apresentando, contudo, diferença em relação ao estado dos rolamentos. O coeficiente de atrito específico para a broca com os rolamentos desgastados aumenta constantemente a medida que, dada a falha da vedação do mesmo, o fluxo de fluido de perfuração pelas partes internas da broca vai aumentando. Associado a esse fato refletem-se os valores muito elevados de MSE, apresentados na fig. 27. A conclusão é de que, em última instância, a broca de rolamento desgastado passa a se comportar de maneira cada vez mais similar a uma ineficiente broca do tipo draga. Dessa forma o acompanhamento da MSE e da EFF_M é apontado como alternativa para o auxílio da interpretação da situação de fundo de poço, conjuntamente com os dados de ROP e WOB em sonda, diminuído assim o risco da atividade, redução das interrupções para procedimentos de pescaria – por força de uma possível perda de cone – e otimização da fase perfurada.

Pode-se inferir, portanto, que vários parâmetros característicos à etapa de perfuração são importantes na determinação da taxa de penetração. Seus efeitos são significativos não somente quando analisados em separado, porém principalmente quando da verificação da correlação existente entre eles, sugerindo assim a realização mais estudos sobre os efeitos das variações de parâmetros de sonda acoplados, de modo a melhor determinar tais relações de acoplamento.

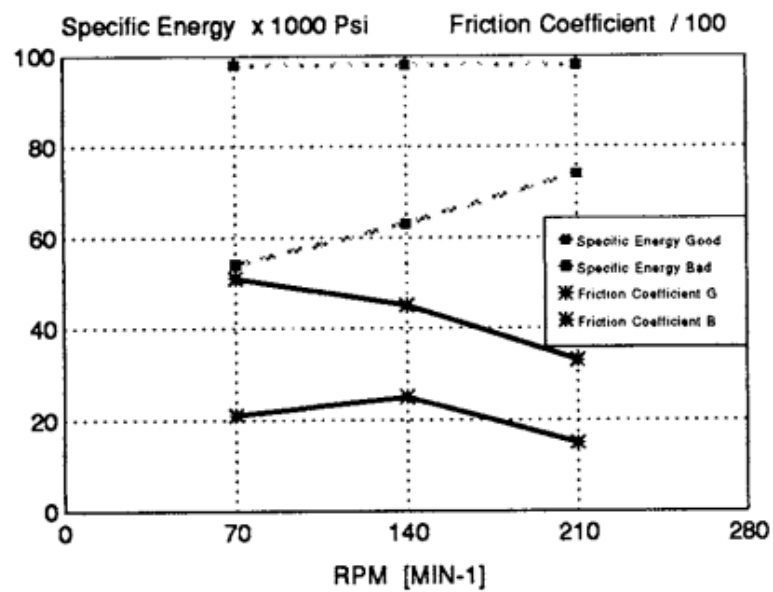


Figura 27 – Desempenho energético das brocas com e sem rolamento problemático [19]

4 REVISÃO DOS MODELOS DE PERFURAÇÃO

4.1 Introdução

A literatura apresenta diversos trabalhos nos quais eram propostos modelos de perfuração sob as mais variadas abordagens. Sob a ótica da energia mecânica específica, Dupriest [21] e Caicedo [22] desenvolvem modelos os quais, a partir do acompanhamento da MSE e da eficiência mecânica, possibilitam a previsão da magnitude ROP em tempo real, além de promoverem uma melhor avaliação da situação do ambiente no qual a broca se encontra, os fenômenos que nele estão sendo desenvolvidos e conferindo maiores quantidades de dados para a tomada de decisão. Entretanto, algumas hipóteses são consideradas, mudando a forma como a teoria de Teale [18] é efetivamente utilizada, de modo que a técnica, apesar de apontada como promissora, necessita a incorporação de alguns conceitos. Ledgerwood [23] e Rafatian [24] promovem discussões para a melhoria dessa técnica.

Do exposto, será dado maior foco para os modelos de perfuração baseados em correlações empíricas do ROP com os parâmetros medidos em superfície, em função dos efeitos respectivos a cada um deles.

4.2 Modelo de Maurer

O primeiro modelo abordado é o descrito por Maurer [25]. A partir do mecanismo de geração de crateras em rochas, o autor descreve uma fórmula para o cálculo da taxa de penetração em função da ação dos dentes da broca. A fórmula foi estabelecida considerando-se a limpeza perfeita do fundo do poço, ou seja, todos os fragmentos de rocha gerados pela ação da broca eram removidos no intervalo entre a ação dos dentes. Nessas condições a taxa de penetração é diretamente proporcional à velocidade de rotação e ao quadrado do peso sobre broca, e inversamente proporcional à raiz quadrada do diâmetro de broca e da tensão de resistência da rocha. A Eq. 5 apresenta tal relação.

$$\frac{dD}{dt} = k \frac{N * WOB}{D_B^2 * S_C^2}$$

Equação 5 – Modelo de Maurer para o ROP

onde $\frac{dD}{dt}$ é a taxa de penetração de broca; S_c é a resistência da rocha; e k é uma constante de proporcionalidade.

4.3 Modelo de Galle & Woods

Galle & Woods [26] também apresentaram equações empíricas de maneira a quantificar os efeitos de WOB, RPM, deformação e desgaste dos dentes e rolamentos de brocas (Eqs. 6 – 8).

$$\frac{dD}{dt} = \frac{K (WOB - M) * N^\lambda}{(1 + C_2 h)}$$

Equação 6 - Modelo de Galle & Woods para o ROP

onde K é a perfurabilidade da rocha; λ é o expoente da velocidade de rotação da broca; C_2 é o parâmetro de desgaste do dente; e h é a altura do dente normalizada (1 para dente novo e 0 para dente desgastado por completo).

$$\frac{dh}{dt} = \frac{A_f (P N - q N^9) * 10^{-9}}{(D_1 - D_2 WOB)(1 + C_1 h)}$$

Equação 7 - Modelo de Galle & Woods para o desgaste dos dentes da broca

sendo $\frac{dh}{dt}$ a taxa de desgaste do dente; A_f o parâmetro de abrasividade da formação; P , q , D_1 e D_2 parâmetros tabelados do tipo e do diâmetro da broca.

$$\frac{dB}{dt} = \frac{N WOB^\alpha}{b}$$

Equação 8 – Modelo de Galle & Woods para o desgaste dos rolamentos da broca

onde $\frac{dB}{dt}$ é a taxa de desgaste do rolamento; α é o expoente do peso sobre broca; e b é a constante dos rolamentos. Devido à natureza ilustrativa a que se destina a apresentação das equações anteriores, sugere-se a consulta à literatura para maiores detalhes descritivos de cálculo de alguns dos parâmetros apresentados.

4.4 Modelo de Cunningham

Cunningham [27] também propõe uma abordagem empírica para o cálculo do ROP, a partir da estimativa dos efeitos, além dos já anteriormente citados, da resistência à perfuração e do diferencial pressão entre a hidrostática exercida pelo fluido e a exercida pela formação. O resultado de sua análise foi comparado aos dados de perfuração anteriormente conhecidos.

$$ROP = \frac{N WOB^\alpha}{0,424 \sigma_d^{1,5} + \sqrt{N WOB^\alpha} (\Delta p)^{0,75}}$$

Equação 9 – Modelo de Cunningham para o ROP

onde σ_d é a resistência à perfuração da rocha; Δp é o diferencial de pressão em situações de *overbalance*; e α é uma constante a ser determinada com outros testes. Maior detalhamento, vide referência [27].

4.5 Modelo de Bourgoyne & Young

Bourgoyne & Young [28] também propuseram um modelo de perfuração que utiliza a análise da regressão de dados registrados durante a perfuração de poços de uma determinada área para inferir coeficientes necessários ao cálculo do ROP. Em seu modelo, os autores tentaram combinar o que se conhecia acerca do processo de perfuração rotativa em um único modelo. São levados em conta os efeitos da resistência da formação rochosa (assim como Cunningham [27]), profundidade, grau de compactação da rocha, diferencial de pressão ao longo do fundo de poço, diâmetro e peso sobre broca, velocidade de rotação, além de desgaste e hidráulica de broca.

$$\frac{dD}{dt} = e^{(a_1 + \sum_{j=2}^8 a_j X_j)}$$

Equação 10 – Modelo de Bourgoyne & Young para o ROP

onde a_i ($i = 1, \dots, 8$) são os coeficientes a serem determinados e X_j ($j = 2, \dots, 8$) são parâmetros de perfuração definidos como:

$$X_2 = 10000 - D$$

Equação 11 – Cálculo do parâmetro de compactação normal de rochas do modelo de Bourgoyne & Young

onde X_2 é o parâmetro de compactação normal e D é a profundidade (em ft);

$$X_3 = D^{0,69}(G_p - 9,0)$$

Equação 12 – Cálculo do parâmetro de subcompactação de rochas do modelo de Bourgoyne & Young

onde X_3 é o parâmetro de subcompactação e G_p é o equivalente em pressão de poros (em lb/gal);

$$X_4 = D(G_p - \rho_c)$$

Equação 13 – Cálculo do parâmetro de diferencial de pressão do modelo de Bourgoyne & Young

onde X_4 é o parâmetro do diferencial de pressão e ρ_c é o peso equivalente do fluido de perfuração em circulação (ECD) (em lb/gal);

$$X_5 = \ln \left[\frac{\left(\frac{W}{D_B} \right) - \left(\frac{W}{D_B} \right)_t}{4,0 - \left(\frac{W}{D_B} \right)_t} \right]$$

Equação 14 – Cálculo do parâmetro de peso sobre broca do modelo de Bourgoyne & Young

onde X_5 é o parâmetro de peso sobre broca; W é o peso sobre broca (em klbs); D_B é o diâmetro da broca (em pol); $\left(\frac{W}{D_B} \right)_t$ é o limiar do peso sobre broca por polegada necessário para o início da perfuração (Klbs);

$$X_6 = \ln \left[\frac{N}{100} \right]$$

Equação 15 – Cálculo do parâmetro de rotação de broca do modelo de Bourgoyne & Young

onde X_6 é o parâmetro de rotação da broca e N é a velocidade de rotação da broca (em rpm);

$$X_7 = -h$$

Equação 16 – Cálculo de desgaste do dente do modelo de Bourgoyne & Young

onde X_7 é o parâmetro de desgaste do dente e h é a fração do desgaste de dente variando de 0 a 1;

$$X_8 = \ln \left[\frac{\rho Q}{350 \mu d_n} \right]$$

Equação 17 – Cálculo do parâmetro de hidráulica de broca do modelo de Bourgoyne & Young

onde X_8 é o parâmetro hidráulico da broca; ρ é o peso específico do fluido de perfuração (em lb/gal); Q é a vazão de bombeio (em gal/min); μ é a viscosidade aparente à $10000^{-1} \text{ s}^{-1}$; d_n é o diâmetro dos jatos da broca (em pol).

Além disso, são propostos modelos para o desgaste do dente e dos rolamentos de uma broca tricônica:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{H_3}{\tau_H} \left[\frac{N}{100} \right]^{H_1} \left[\frac{\left(\frac{W}{D_B} \right)_{MAX} - 4}{\left(\frac{W}{D_B} \right)_{MAX} - \left(\frac{W}{D_B} \right)} \right] \left[\frac{1 + \frac{H_2}{2}}{1 + H_2 h} \right]$$

Equação 18 – Modelo de Bourgoyne & Young para o desgaste dos dentes da broca

onde $\frac{dh}{dt}$ a taxa de desgaste dos dentes; $H_1, H_2, H_3, \left(\frac{W}{D_B} \right)_{MAX}$ são valores tabelados em função do tipo de broca; e τ_H é a constante de abrasividade da formação (horas)

$$\frac{dB}{dt} = \frac{1}{\tau_b} \left[\frac{N}{100} \right]^{b_1} \left[\frac{W}{4D_B} \right]^{b_2}$$

Equação 19 – Modelo de Bourgoyne & Young para o desgaste dos rolamentos da broca

onde $\frac{dB}{dt}$ é a taxa de desgaste dos rolamentos; τ_b é a constante da vida útil dos rolamentos (horas); e b_1, b_2 são constantes tabeladas em função do tipo de fluido de perfuração e tipo de rolamento.

4.6 Modelo de Reza & Alcocer

A análise dimensional foi a abordagem de tratamento da modelagem de perfuração desenvolvida em 1986 por Reza & Alcocer [29].

$$\frac{dD}{N d} = K_1 \left[\frac{N d^2}{v} \right]^{a_{R_1}} \left[\frac{N d^3}{Q} \right]^{a_{R_2}} \left[\frac{E d}{W_d} \right]^{a_{R_3}} \left[\frac{\Delta P d}{W_d} \right]^{a_{R_4}}$$

Equação 20 – Modelo de Reza & Alcocer para o ROP

onde v é a viscosidade do fluido de perfuração (em cp); E é a dureza da rocha (em lb/pol²); W_d é o peso por diâmetro de broca (em klbs/pol); ΔP é o diferencial de pressão (em lb/pol²); K_1 é um coeficiente de proporcionalidade; e a_{R_i} são coeficientes a determinar.

Foram também desenvolvidas expressões para a taxa de desgaste tanto dos dentes da broca, quanto de seus rolamentos.

$$\frac{\dot{h}}{N D} = K_2 \left[\frac{Q}{N D^3} \right]^{b_{R_1}} \left[\frac{W}{E D_B^2} \right]^{b_{R_2}} \left[\frac{v D}{Q} \right]^{b_{R_3}}$$

Equação 21 – Modelo de Reza & Alcocer para o desgaste dos dentes da broca

onde \dot{h} a taxa de desgaste dos dentes; D_B diâmetro de broca; e K_2 é a constante de proporcionalidade; e b_{R_i} são coeficientes a determinar.

$$\frac{\dot{B}}{N} = K_3 \left[\frac{t_f H d}{W_d N} \right]^{c_{R_1}} \left[\frac{v}{N d^2} \right]^{c_{R_2}} \left[\frac{Q}{N D^3} \right]^{c_{R_3}}$$

Equação 22 – Modelo de Reza & Alcocer para o desgaste dos rolamentos da broca

onde \dot{B} é a taxa de desgaste dos rolamentos; t_f é a temperatura no fundo do poço (em °F); e K_3 é a constante de proporcionalidade; e c_{R_i} são coeficientes a determinar.

4.7 Modelo de Ohara

O modelo descrito por Ohara [5] é desenvolvido com base nas metodologias consideradas por Bourgone & Young [28] e Reza & Alcocer [29], conjugando assim uma modelagem exponencial de parâmetros advindos do processo de análise dimensional. Para tais parâmetros ou grupamentos, algumas hipóteses e considerações são descritas de modo a conferir ao modelo um maior grau de similitude com a realidade física do problema de modelagem da taxa de penetração de broca. Sendo assim, o autor obtém como resultado final a seguinte equação:

$$\frac{dD}{N D_B} = e^{(b_1 + b_2 X_2 + X_3^{b_3} + X_4^{b_4} + b_5 X_5 + X_6^{b_6})}$$

Equação 23 – Modelo de Ohara para o ROP

onde b_i ($i = 1, \dots, 6$) são os coeficientes a serem determinados por regressão linear e X_j ($j = 2, \dots, 6$) são parâmetros de perfuração definidos como:

$$X_2 = \ln \left[\frac{WOB}{S_c D_B^2} \right]$$

Equação 24 – Cálculo do parâmetro de peso sobre broca do modelo de Ohara

onde X_2 é o parâmetro de peso sobre broca;

$$X_3 = -\frac{\Delta P}{S_c}$$

Equação 25 – Cálculo do parâmetro de diferencial de pressão do modelo de Ohara

onde X_3 é o parâmetro de diferencial de pressão e $\Delta P = P_{hidrostática} - P_{poros; do fluido}$;

$$X_4 = \left[2 - \frac{D}{D_B} 5 * 10^{-5} \right]$$

Equação 26 – Cálculo do parâmetro de compactação do modelo de Ohara

onde X_4 é o parâmetro de compactação;

$$X_5 = \ln \left[\frac{F_j}{S_c D_B^2} \right]$$

Equação 27 – Cálculo do parâmetro de hidráulica de broca do modelo de Ohara

onde X_5 é o parâmetro de hidráulica da broca;

$$F_j = 0,01823 * C_D * Q * \sqrt{\rho_m \Delta P_b}$$

Equação 28 – Cálculo da força de jato para o modelo de Ohara

onde F_j é o parâmetro de hidráulica da broca (em lbs); $C_D = 0,95$ é o coeficiente de descarga; Q é a vazão de bombeio (em gal/min); ρ_m é o peso do fluido de perfuração (em lb/gal); e ΔP_b é a perda de carga na broca (em pol^2);

$$\Delta P_b = \frac{8,311 * 10^{-5} * \rho_m * Q^2}{C_D^2 A_t^2}$$

Equação 29 – Cálculo da perda de carga para o modelo de Ohara

onde A_t é a área total de fluxo dos jatos.

$$X_6 = -\frac{H}{D_B}$$

Equação 30 – Cálculo do parâmetro de altura do dente da broca do modelo de Ohara

onde X_6 é o parâmetro da altura do dente;

5 ESTUDO DE CASO – MODELO OHARA APLICADO AO PRÉ-SAL

A presente seção tem como objetivo descrever o estudo de caso realizado acerca da aplicabilidade do modelo de Ohara [5] para três poços perfurados área do Pré-Sal. A justificativa da escolha do referido modelo se baseia na necessidade de previsão satisfatória dos pacotes litológicos a serem perfurados. Em seu estudo, Ohara [5] apresenta uma comparação de resultados obtidos a partir do ROP simulado em seu modelo e o simulado pelo modelo de Bourgoyne & Young para poços perfurados em área marítima de Alagoas (Brasil). O autor verifica que o erro associado à previsão da taxa de penetração em seu modelo é significativamente menor do que ao associado ao modelo de Bourgoyne & Young. Assim, foi verificada no presente trabalho a aplicabilidade do modelo escolhido para três grupos de litologias encontradas nos três poços na área do Pré-Sal anteriormente mencionados; Sal (rocha selante), SAG (rocha reservatório) e Basalto (embasamento ígneo).

A metodologia adotada para a realização das simulações é descrita na seção a seguir, bem como os resultados, objetivando um entendimento mais claro por parte do leitor.

6 METODOLOGIA E RESULTADOS

6.1 Obtenção dos parâmetros X_j

Dados registrados pelo Sistema de Monitoração de sonda foram utilizados para o cálculo dos parâmetros X_j . Dessa forma, foram necessárias as informações relativas à taxa de penetração (ROP), peso sobre broca (WOB), velocidade de rotação da broca (N), diferencial de pressão (ΔP), diâmetro da broca (D_B), força dos jatos da broca (F_j), profundidade (D), resistência à compressão da rocha (S_c) e altura dos dentes da broca (H). Todas podem ser obtidas através dos dados de *mud logging*, quadro de brocas e perfil sônico. Os dados fornecidos foram submetidos a uma inspeção, de maneira a verificar e eliminar possíveis inconsistências físicas e erros de medição por parte das ferramentas e/ ou do Sistema de Monitoração. Especificamente para o perfil sônico foi desenvolvido um filtro de dados na plataforma computacional Wolfram Mathematica® 8.0, cujo código encontra-se disponível no Anexo A. Os registros de ΔP , S_c e H foram gerados de forma indireta, por meio de cálculos e hipóteses consideradas e descritas abaixo, objetivando a adequação com a conformidade física da situação.

De maneira a determinar o ΔP é necessária a determinação da pressão hidrostática de fluido e da pressão de poros. A primeira é obtida através do peso de fluido de perfuração informado via *mud logging*, enquanto a pressão de poros é determinada a partir do gradiente de poros. Este, por sua vez, foi determinado como tendo 0,3 lb/gal a menos que o peso de fluido de perfuração.

$$\Delta P = 0,1705 * D * (\rho_m - G_p)$$

Equação 31 – Cálculo da diferença de Pressão

onde D é a profundidade (em m), ρ_m é o peso do fluido de perfuração (em lb/gal) e G_p é o gradiente de poros (em lb/gal).

$$G_p = (\rho_m - 0,3)$$

Equação 32 – Cálculo do gradiente de Poros

A resistência à compressão da rocha (S_c) resulta de um cálculo feito a partir da metodologia descrita por Ohara [5], a qual se baseia no critério determinado por Mason [30] para cálculo da tensão de resistência à compressão da rocha como função

do tempo de trânsito cisalhante. O tempo de trânsito cisalhante é função, por sua vez, do tempo de trânsito compressional, obtido através dos registros de perfis sônicos (perfil BHC – *Bore Hole Compensated*), e outros dois parâmetros tabelados relacionados à litologia atravessada pelo perfil, segundo a Eq.33. Ressalta-se ainda que não foi possível obter dados de perfil sônico para todas as três litologias estudadas no poço B, de forma que o processamento das informações foi possível somente para parte da camada de rocha salina.

$$\Delta t_s = \Delta t_c \left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)^\alpha \quad (33)$$

onde Δt_s é o tempo de trânsito cisalhante (em μs), Δt_c é o tempo de trânsito compressional (em μs), $\left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)$ e α são valores tabelados [5].

Com relação à altura dos dentes de broca, duas hipóteses foram assumidas. A primeira diz respeito a não consideração do desgaste dos mesmos. Isso é justificado pela utilização de brocas de inserto de carbeto de tungstênio (TCI), PDC e impregnadas quando da perfuração das três litologias estudadas, cujo fator determinante para suas respectivas substituições se dá pela perda dos cortadores (no caso específico de TCI's e PDC's). Para essas brocas é admitido que no momento em que um dente/ cortador se perde, a tendência é que rapidamente os dentes/cortadores da mesma fileira também se desprendam, implicando assim a troca da broca. A segunda hipótese se refere à adoção de valores fixos para os dentes/cortadores em função do diâmetro de broca, ilustrada na tabela a seguir (Tab.1).

Tabela 1 - – Altura dos dentes/cortadores em função do diâmetro de broca

Diâmetro de Broca (pol)	Altura do dente/cortador (pol)
17, 5	1,3
12,25	1,0
8,5 / 8,75	0,5

6.2 Obtenção dos Resultados para os Poços A e B

Uma vez estabelecidos e devidamente filtrados, os dados de sonda são então agrupados por diferentes litologias e diferentes diâmetros de broca, ou fases do poço. Isso é fundamental para a correta conjugação entre a modelagem matemática e a

representação satisfatória da realidade, pois o tratamento dos dados em função da geologia atravessada por cada fase do poço preserva a coerência física do modelo. Caso fosse considerada somente a profundidade para o cálculo dos coeficientes, não seria possível correlacionar dois ou mais poços de uma mesma área que apresentasse, por exemplo, ocorrência de domos salinos, intrusões magmáticas, falhas ou qualquer outra estrutura geológica que impedisse a continuidade das formações rochosas. Assim, é efetuado um tratamento estatístico de regressão múltipla para a obtenção dos coeficientes b_i de dois dos três poços estudados (Poços A e B), em função dos pacotes geológicos encontrados por cada um deles. Foi desenvolvido um programa para o cálculo dos coeficientes também na plataforma computacional Wolfram Mathematica ® 8.0, cujo código encontra-se no Anexo B. Uma vez obtidos os coeficientes para cada grupo de dados, o modelo foi checado para aquele mesmo conjunto de dados utilizados na regressão. A seguir, os resultados obtidos para as diferentes fases e diferentes litologias dos dois primeiros poços (A e B) (Figs 28 a 39).

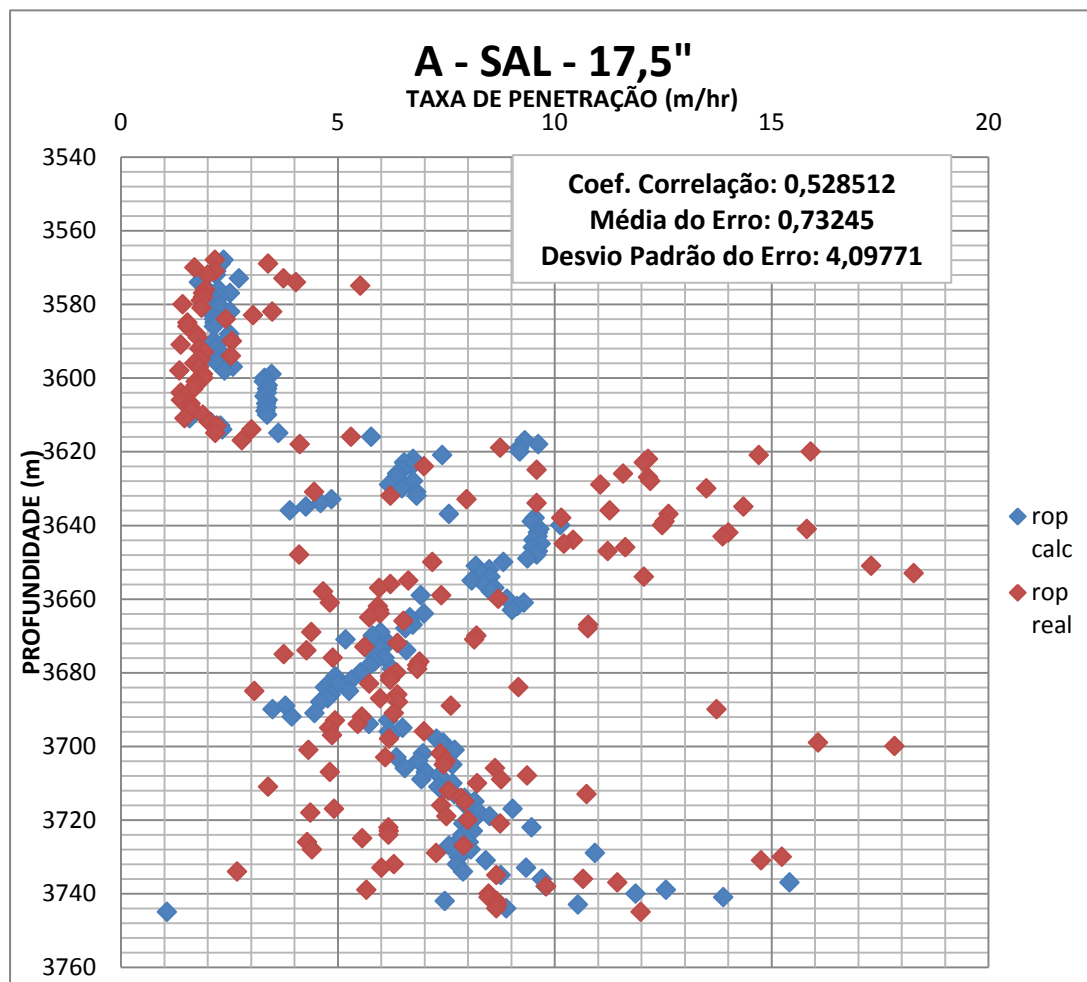


Figura 28 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço A, Sal, Fase de 17,5"

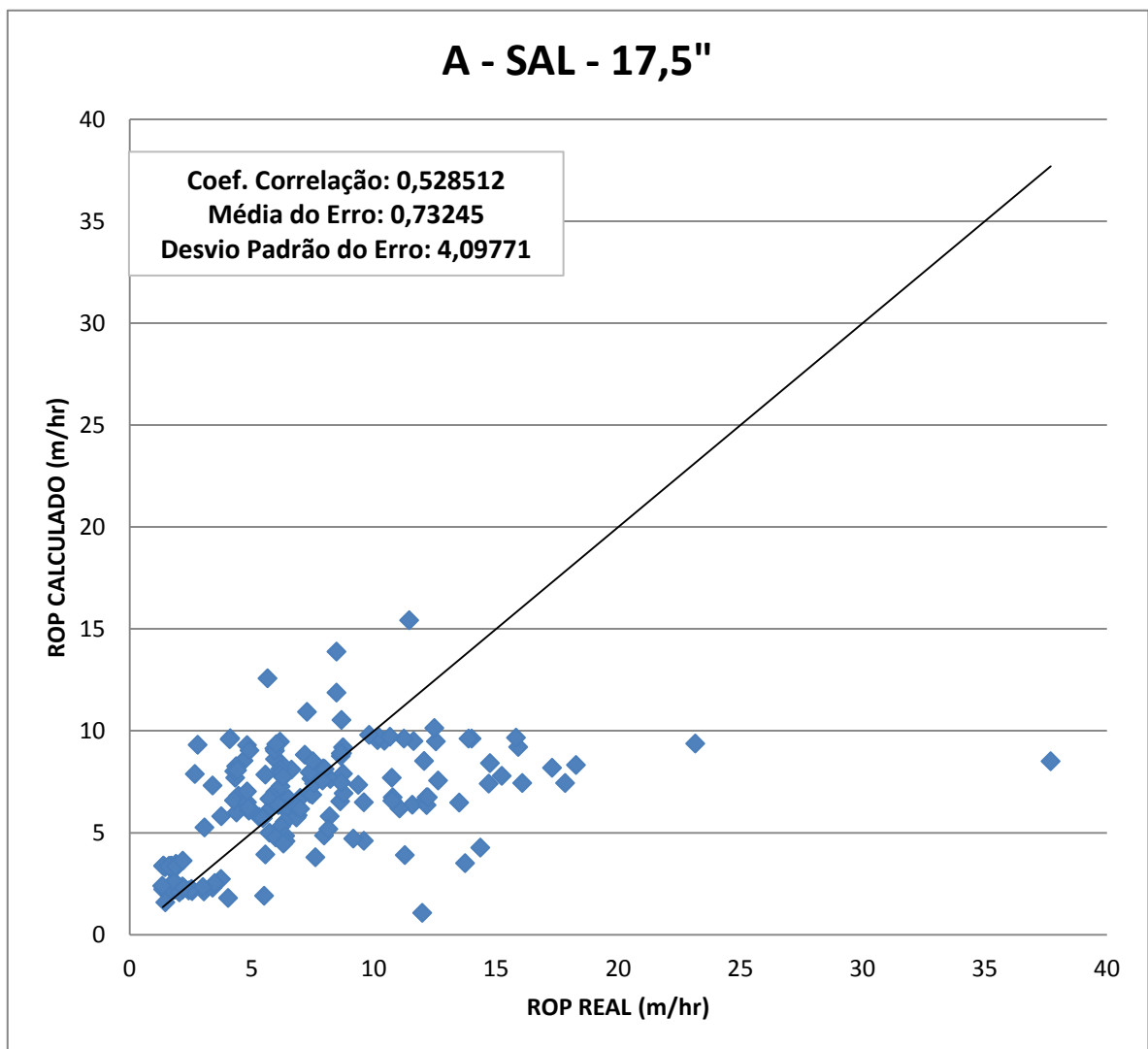


Figura 29 - ROP real vs ROP calculado - Poço A - Sal - 17,5"

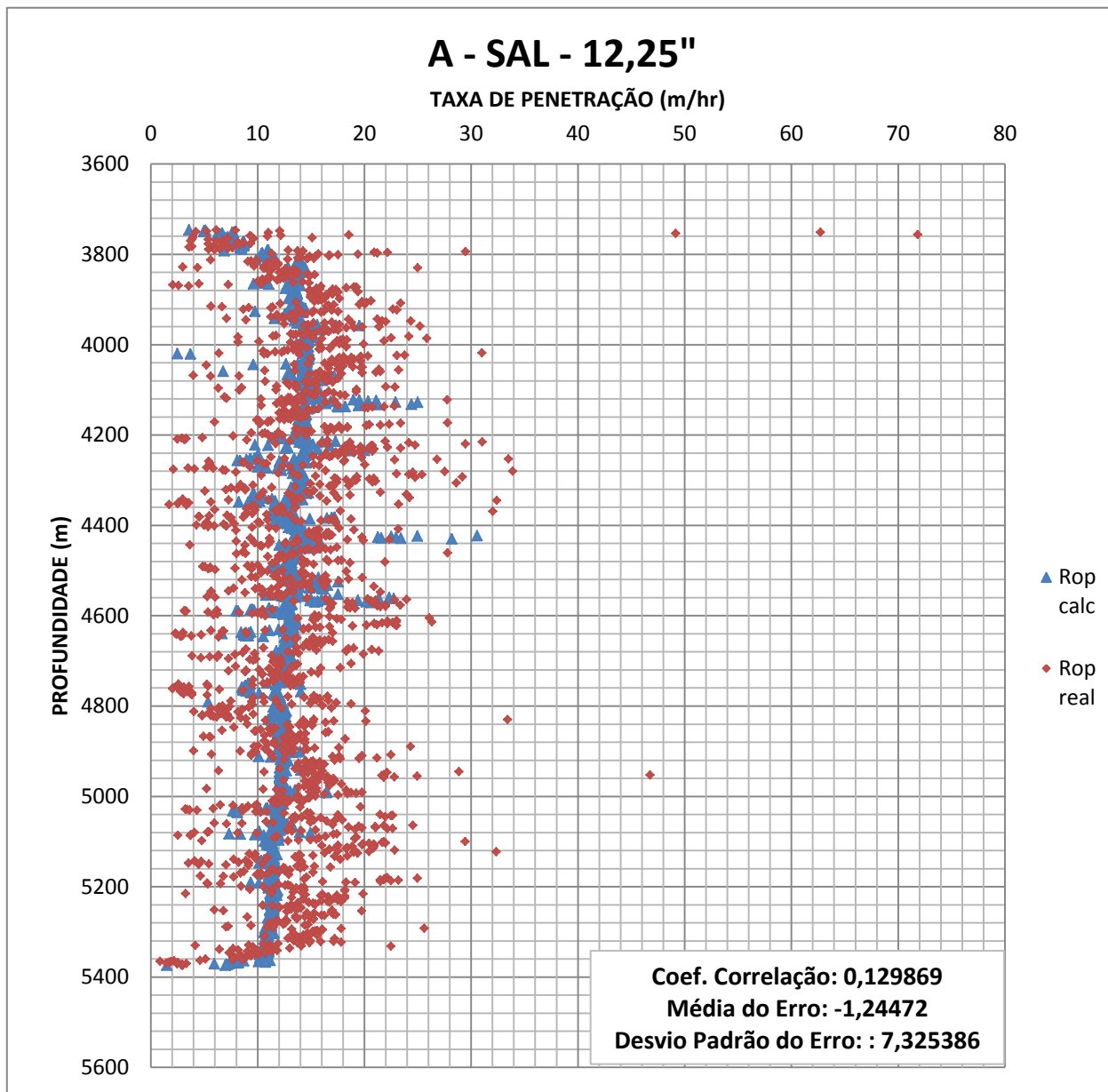


Figura 30 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço A, Sal, Fase de 12,25"

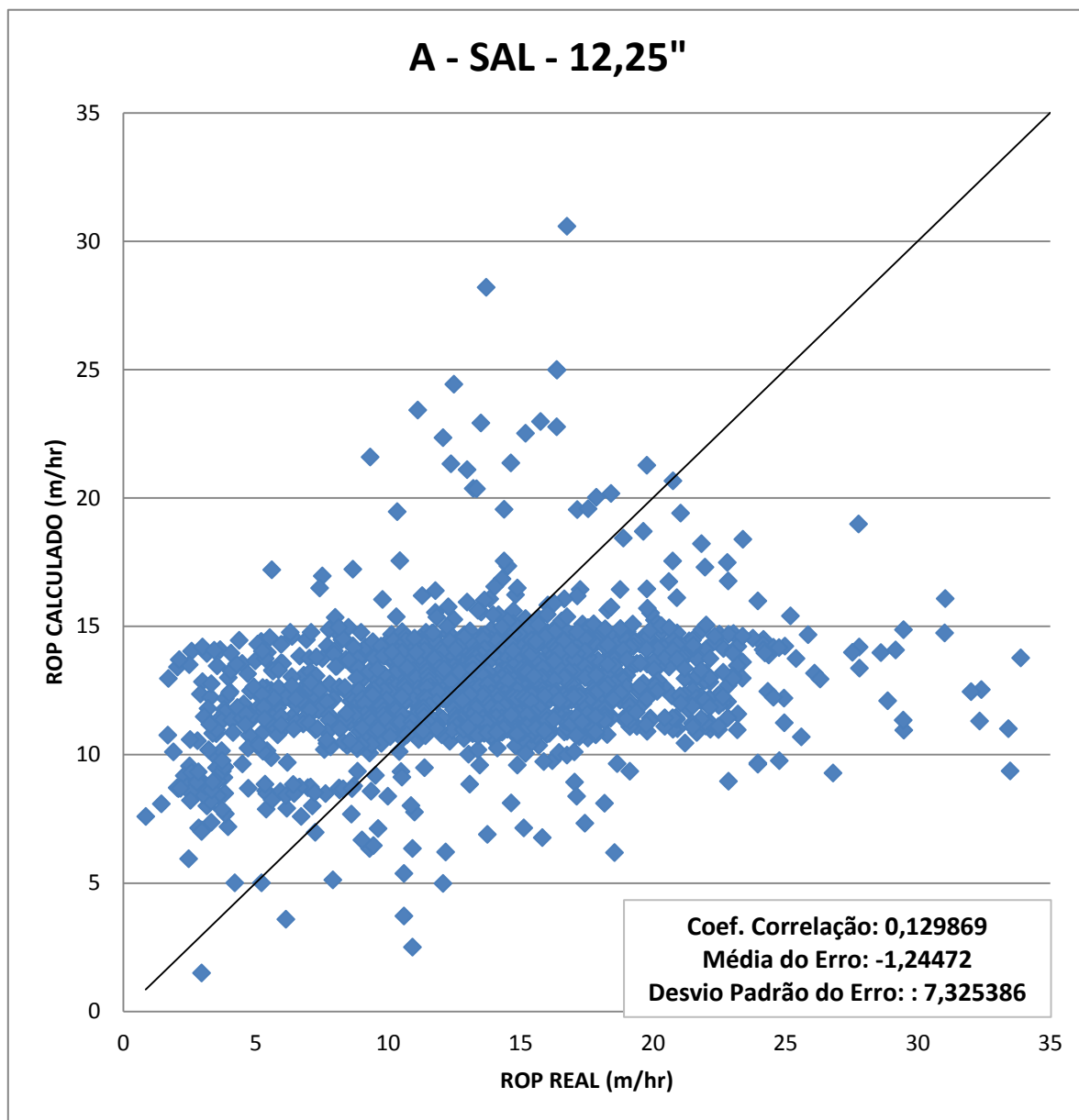


Figura 31 - ROP real vs ROP calculado - Poço A - Sal - 12,25"

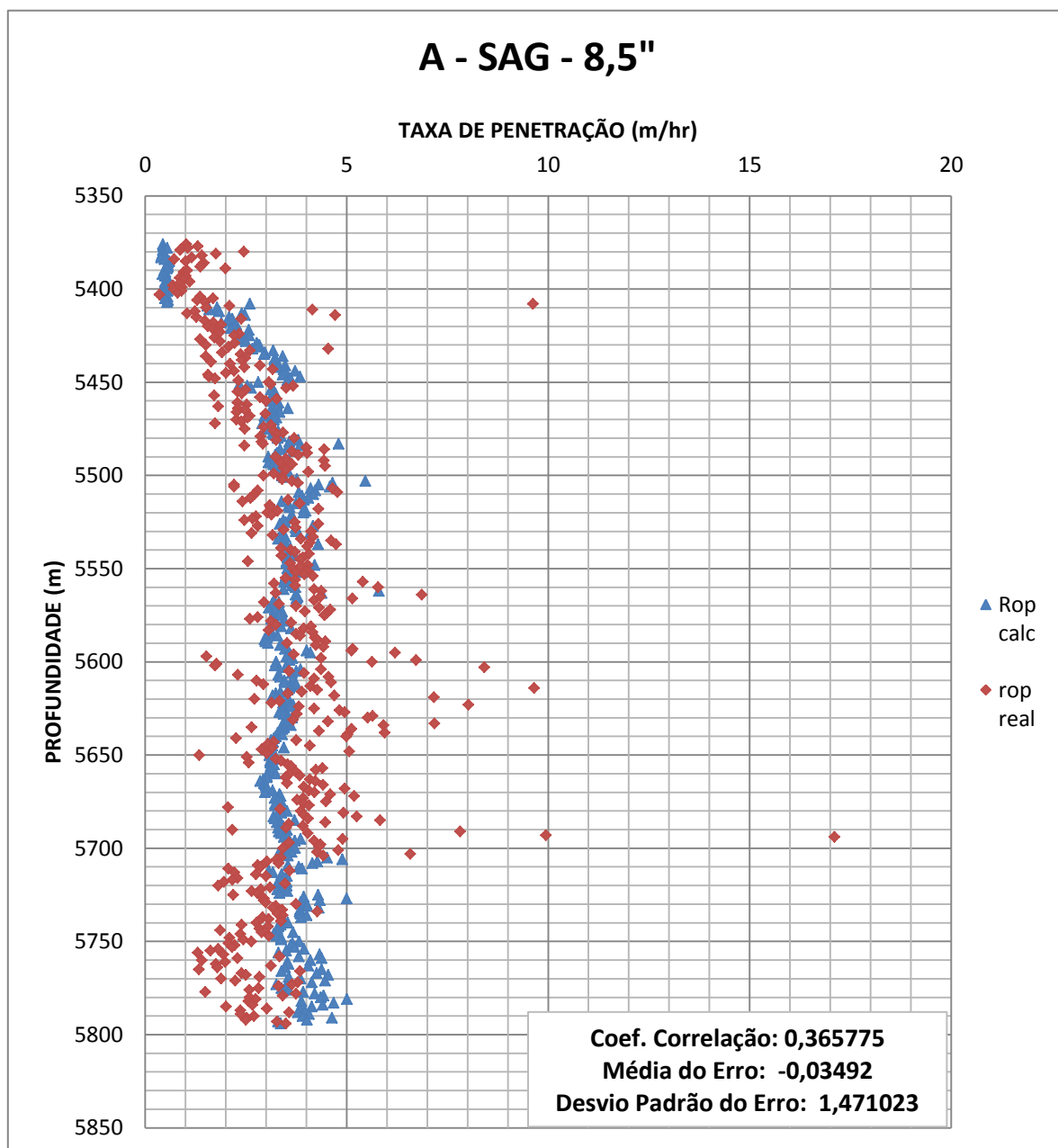


Figura 32 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço A, SAG, Fase de 8,5"

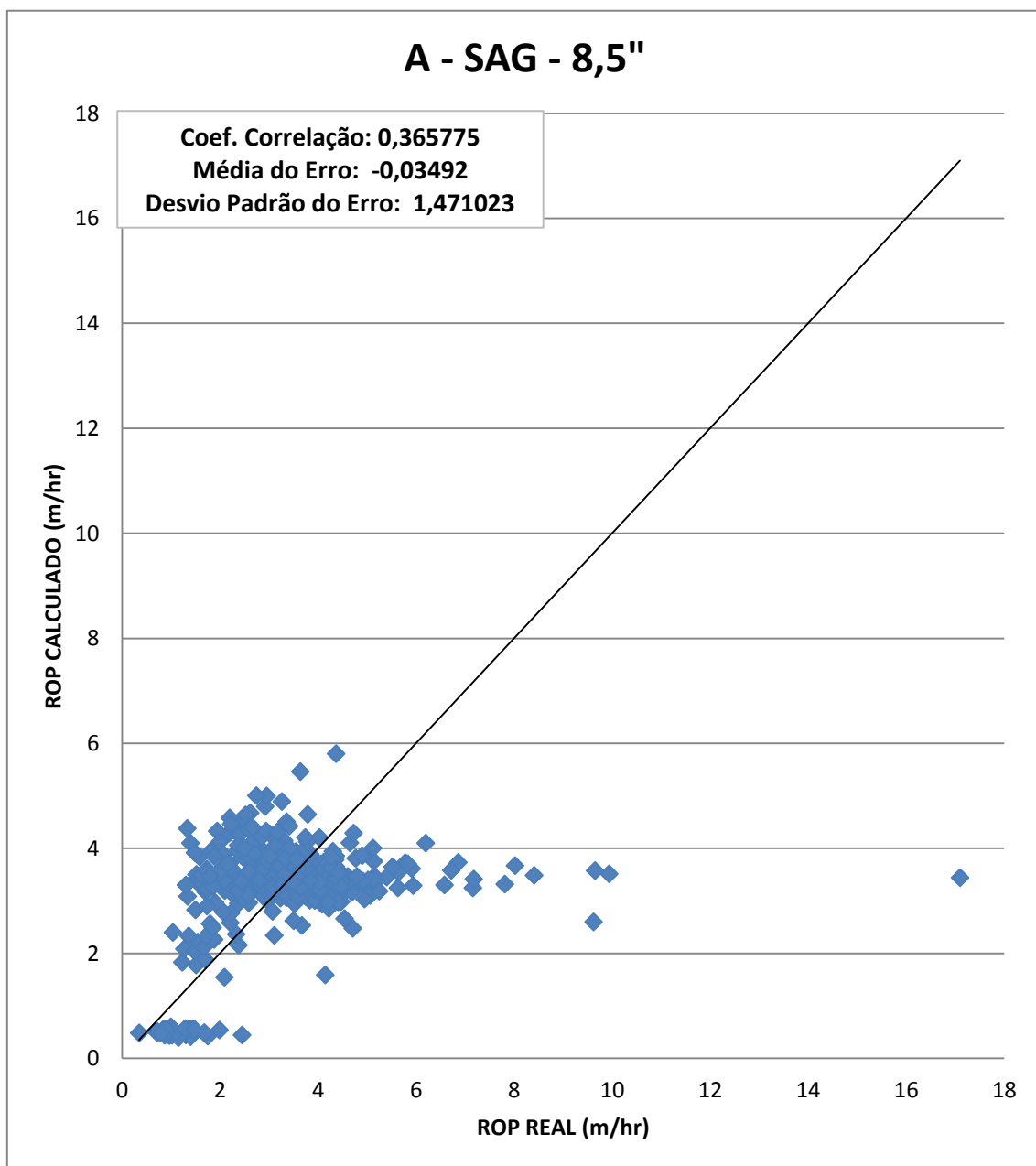


Figura 33 - ROP real vs ROP calculado - Poço A - SAG - 8,5"

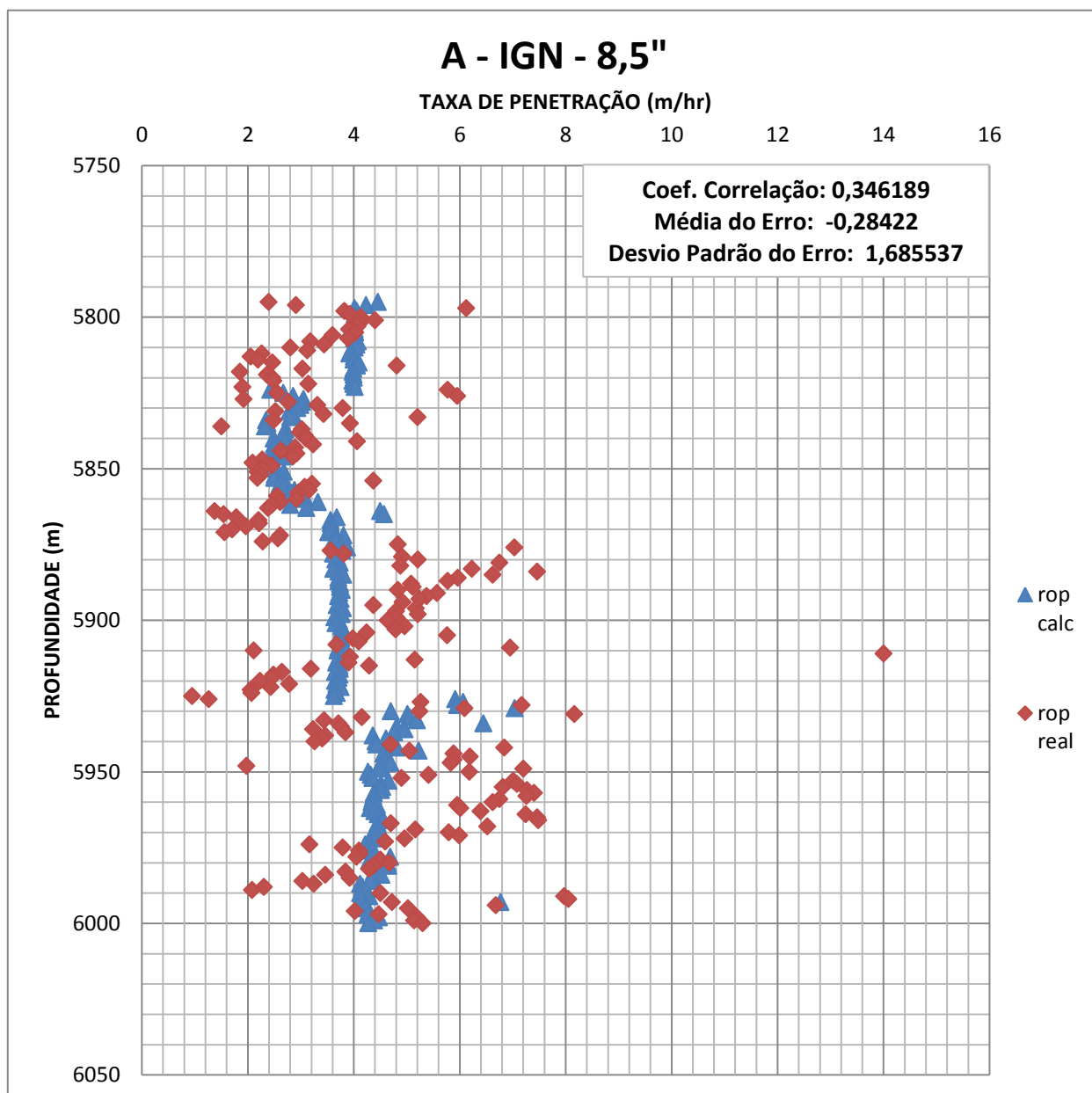


Figura 34 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço A, IGN, Fase de 8,5"

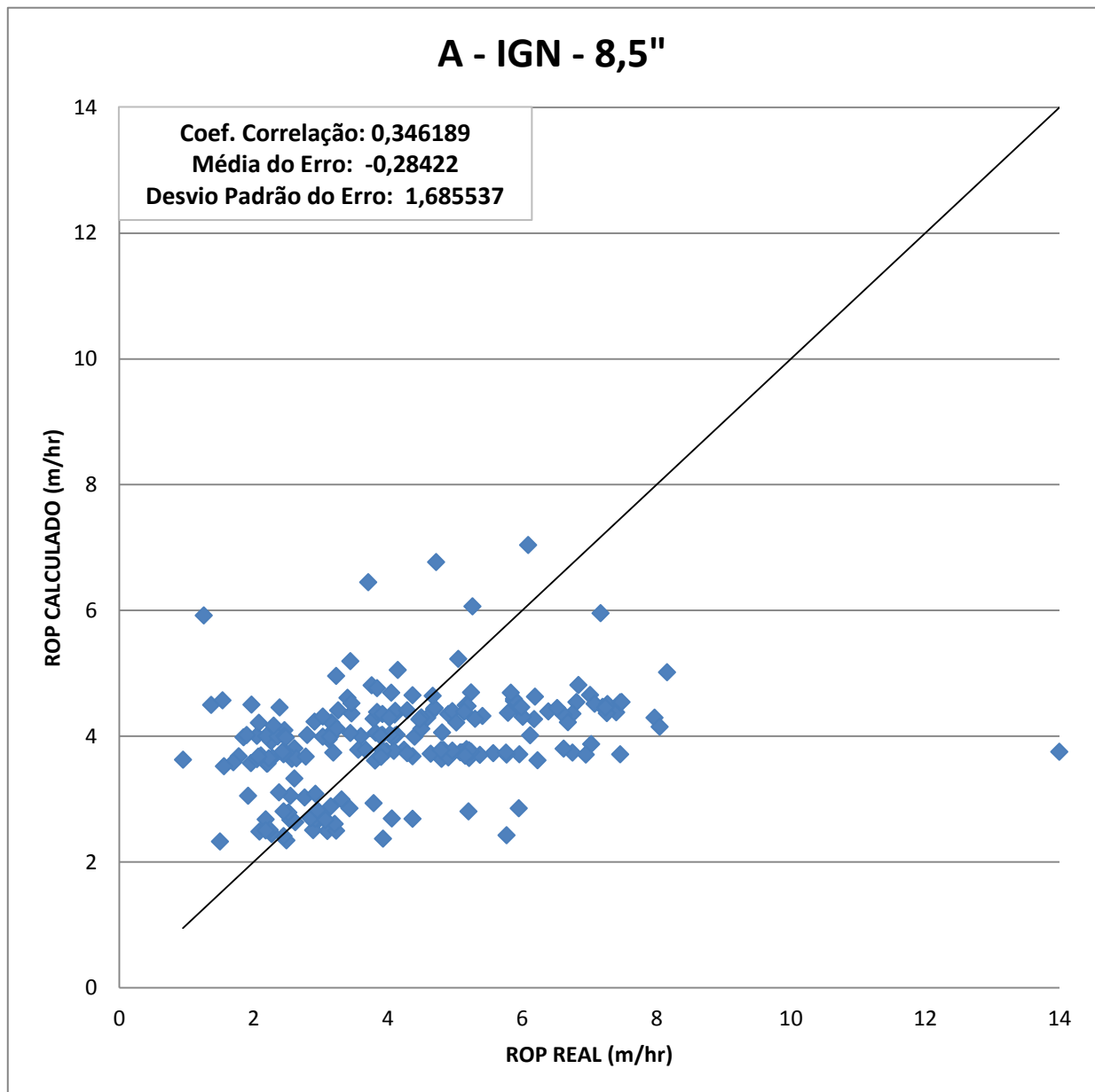


Figura 35 - ROP real vs ROP calculado - Poço A - IGN - 8,5"

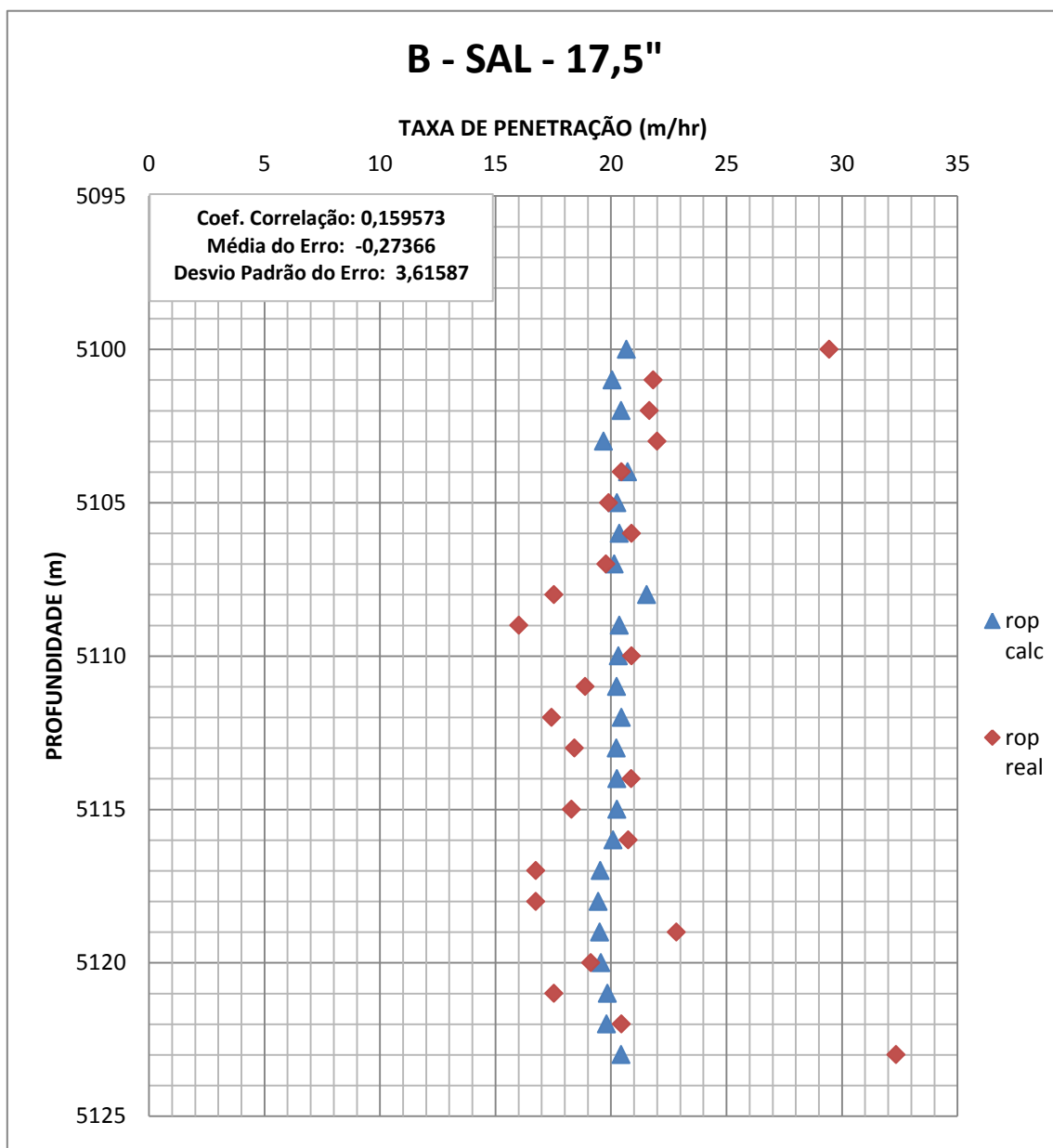


Figura 36 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço B, Sal, Fase de 17,5"

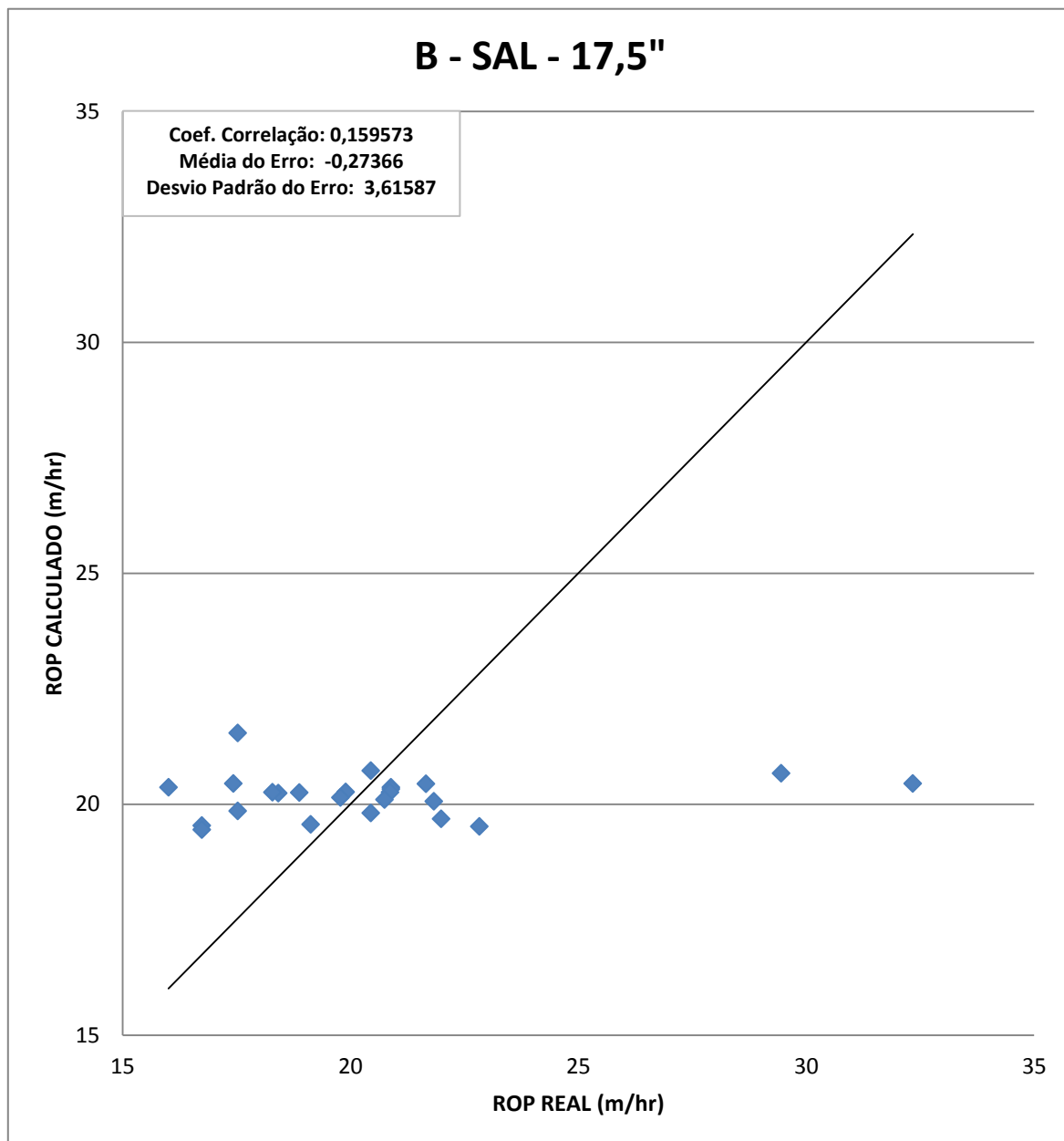


Figura 37 - ROP real vs ROP calculado - Poço A - Sal - 17,5"

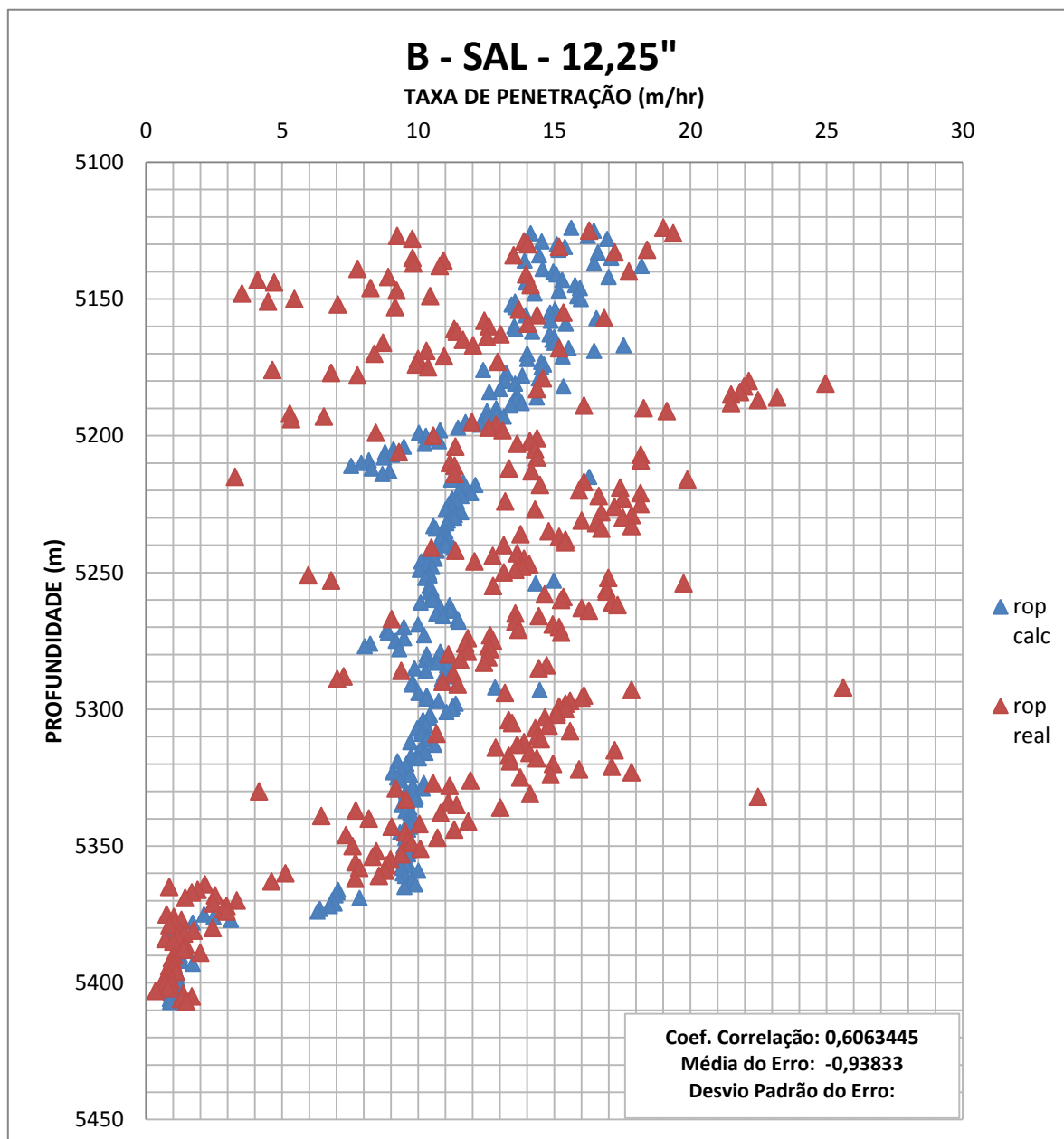


Figura 38 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço B, Sal, Fase de 12,25"

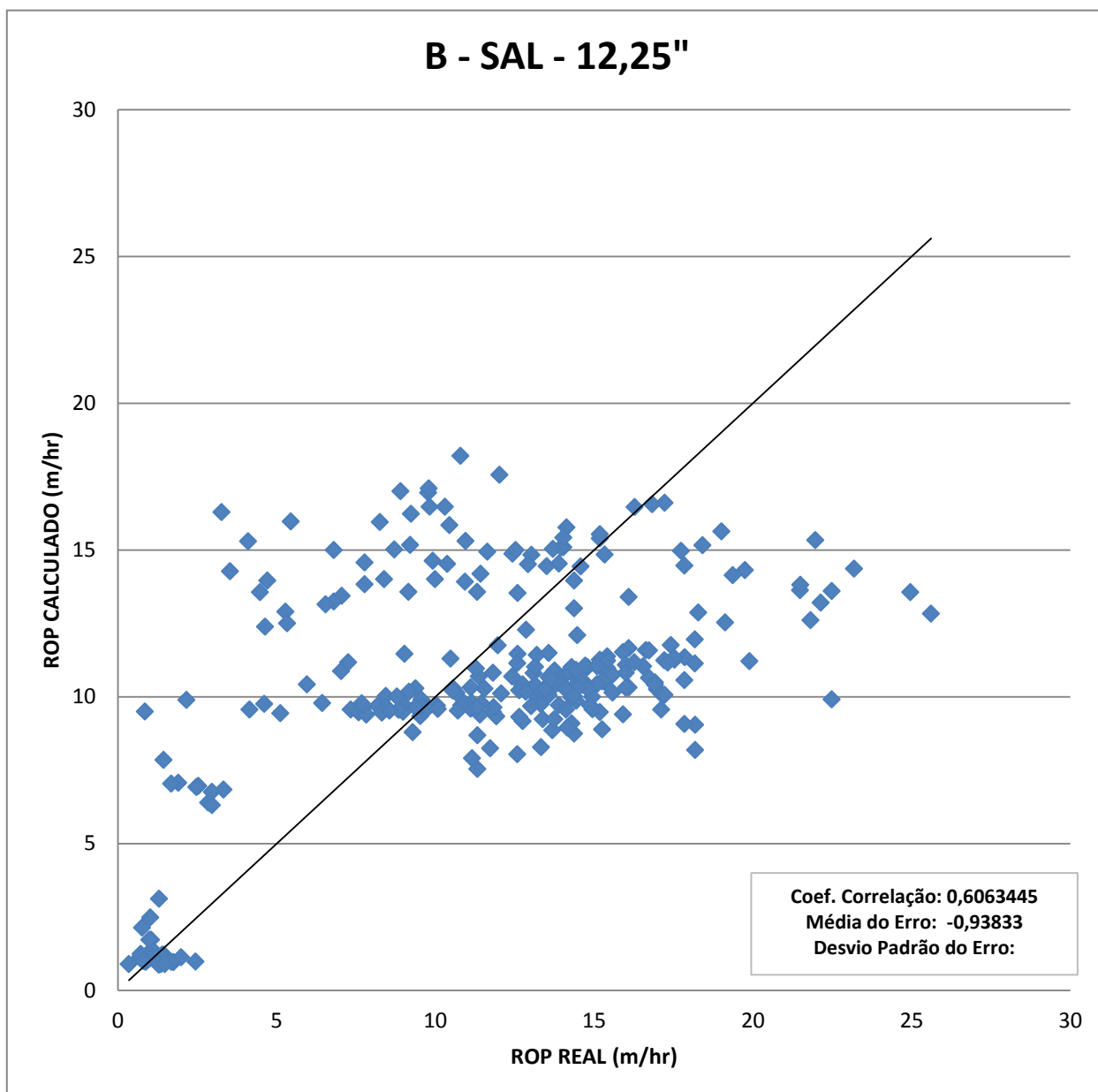


Figura 39 - ROP real vs ROP calculado - Poço A - Sal - 12,25"

6.3 Filtragem dos resultados dos Poços A e B

Das figuras anteriores nota-se uma grande dispersão dos dados de ROP reais para uma mesma litologia. Desse modo, foi realizada uma filtragem, tanto dos dados de ROP medidos e registrados no *mud logging*, quanto daqueles calculados a partir dos coeficientes determinados via regressão múltipla. Esse filtro corresponde à realização de uma média desses dois parâmetros a cada cinco metros de profundidade em um mesmo pacote litológico e mesma fase. Com isso, objetivou-se a redução da ocorrência de picos principalmente nos dados reais. As figuras abaixo mostram os gráficos correspondentes aos resultados da aplicação do procedimento de filtragem (Figs.40 a 51)

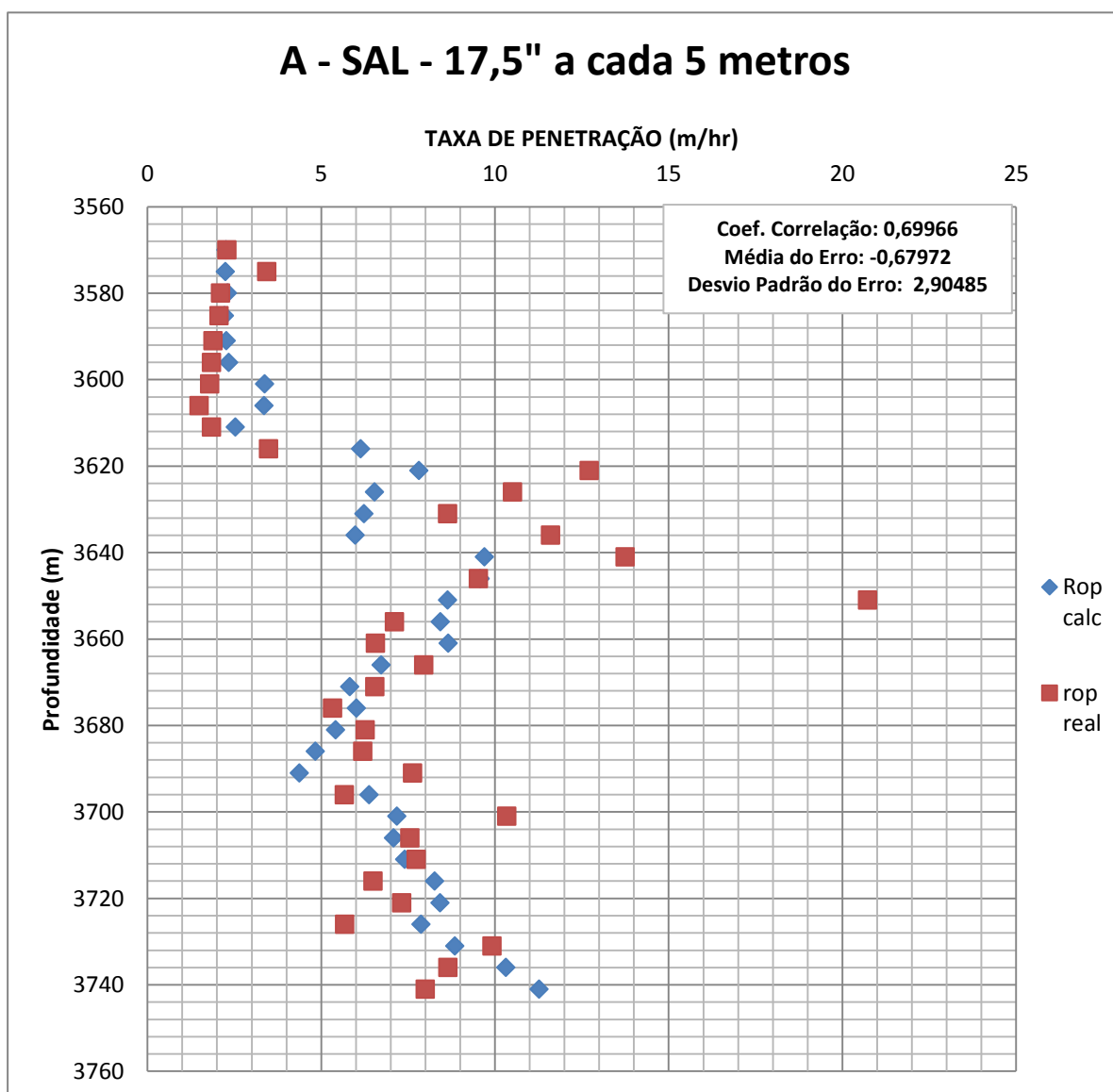


Figura 40 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço A, Sal, Fase de 17,5" a cada 5 metros

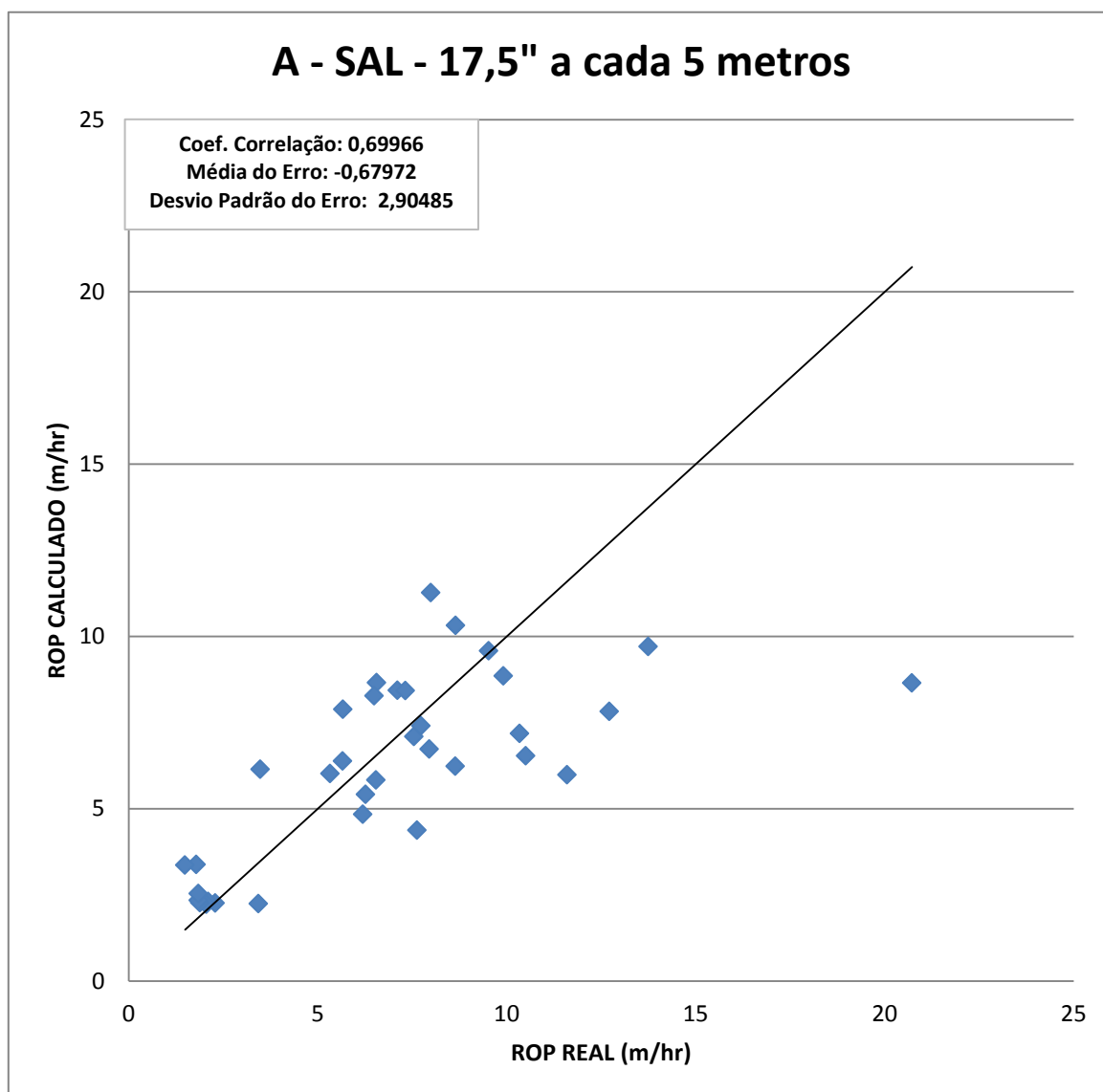


Figura 41 - ROP real vs ROP calculado - Poço A - Sal - 17,5" a cada 5 metros

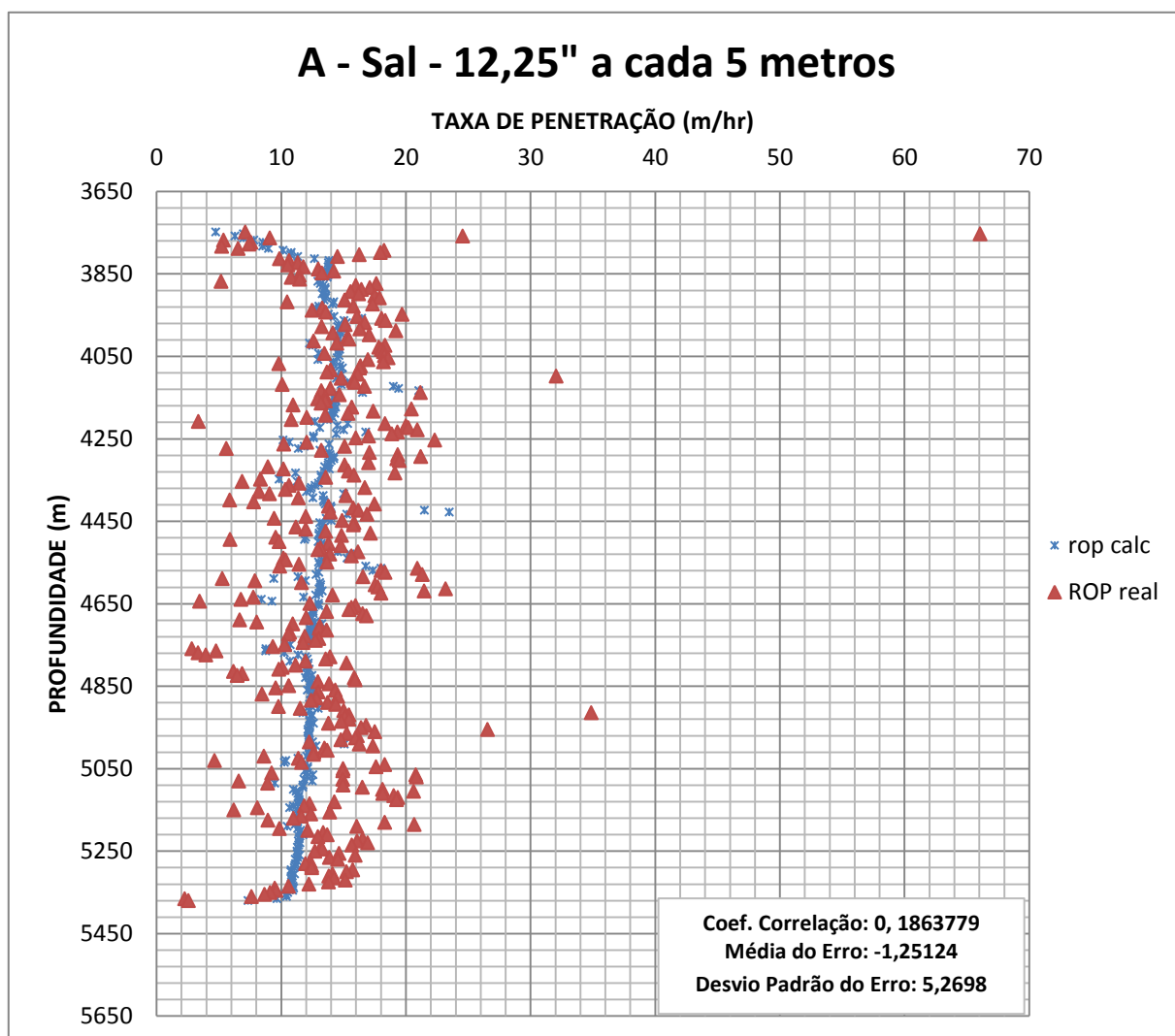


Figura 42 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço A, Sal, Fase de 12,25" a cada 5 metros

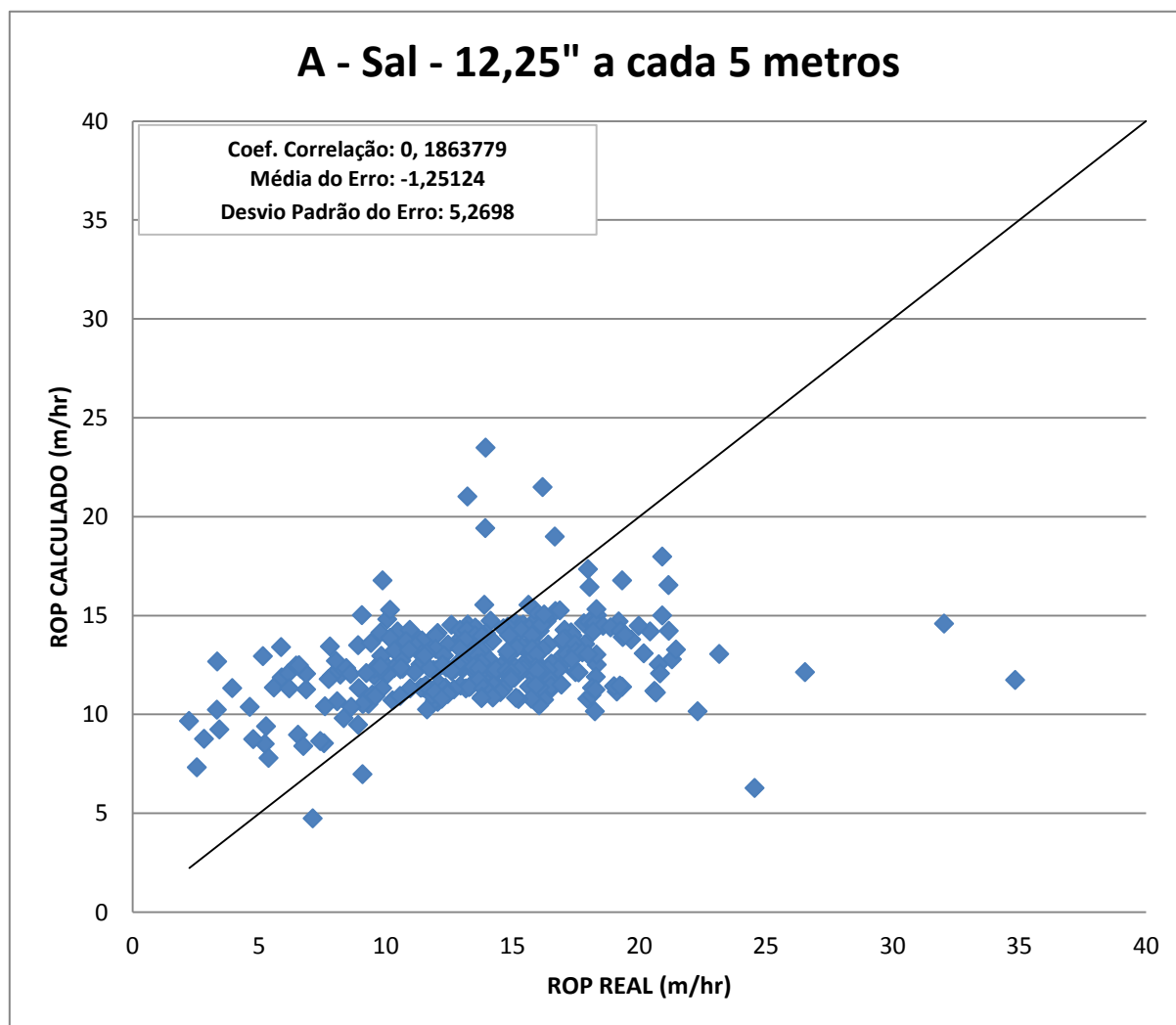


Figura 43 - ROP real vs ROP calculado - Poço A - Sal - 12,25" a cada 5 metros

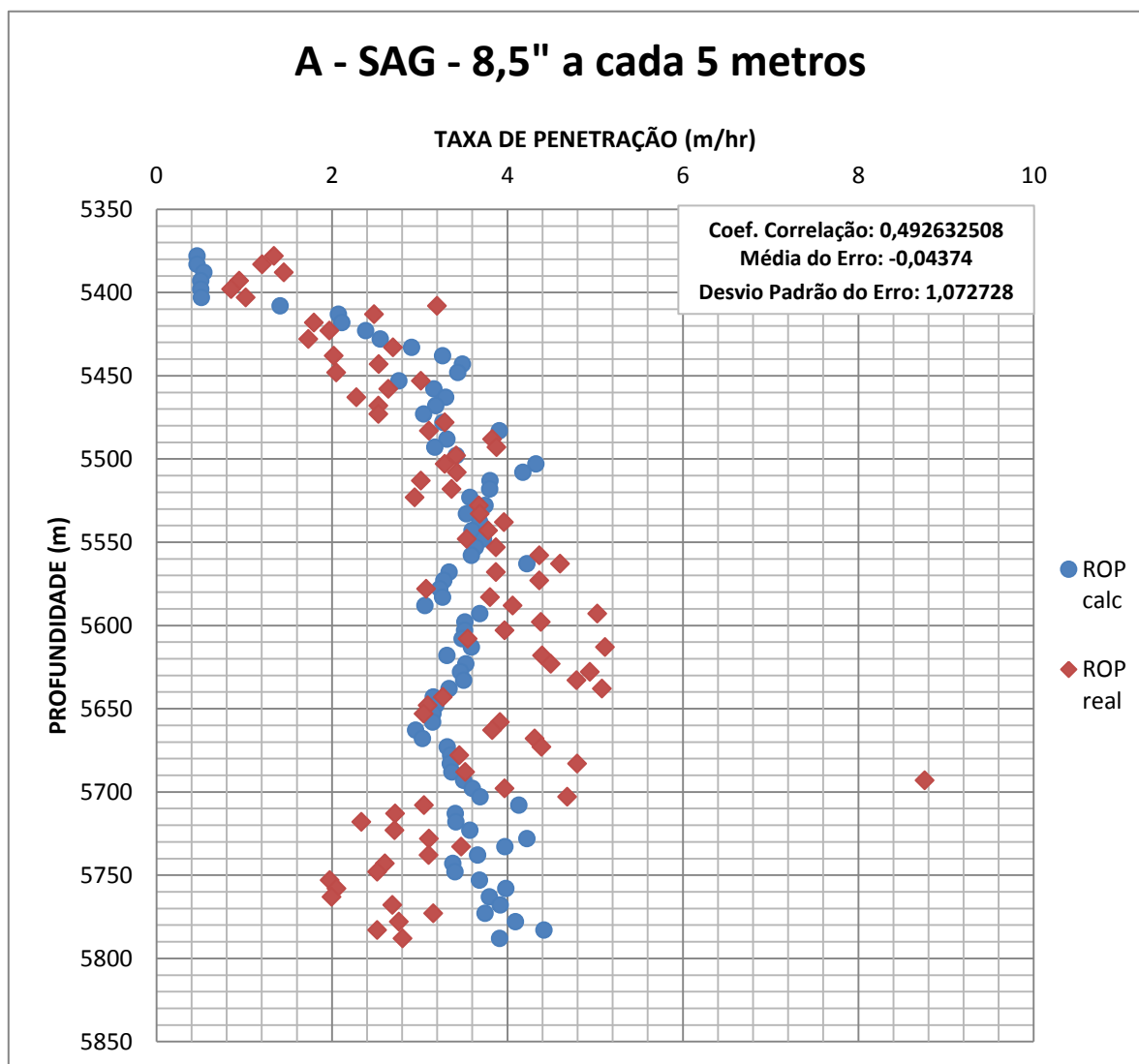


Figura 44 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço A, SAG, Fase de 8,5" a cada 5 metros

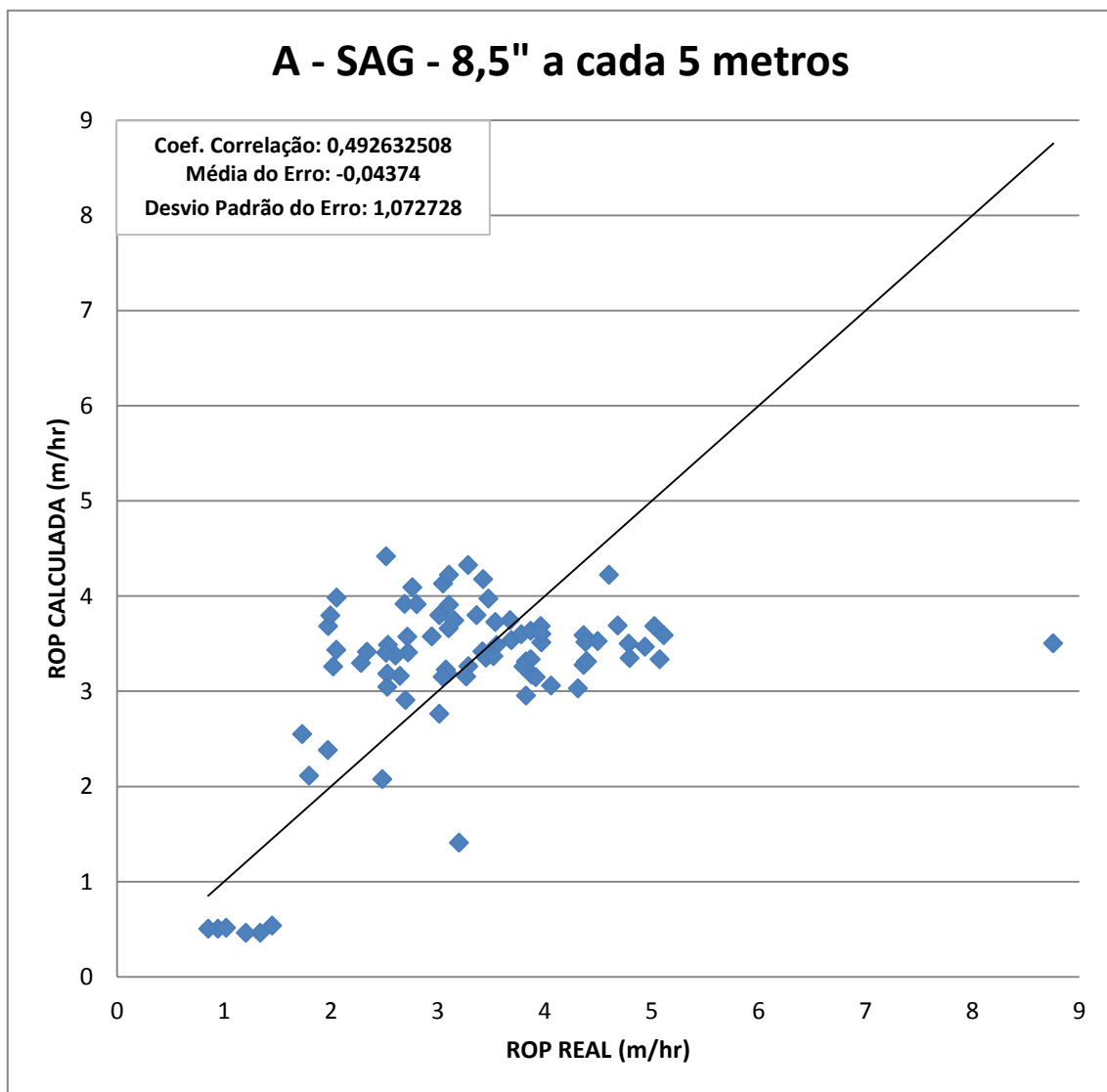


Figura 45 - ROP real vs ROP calculado - Poço A - SAG - 8,5" a cada 5 metros

A - IGN - 8,5" a cada 5 metros

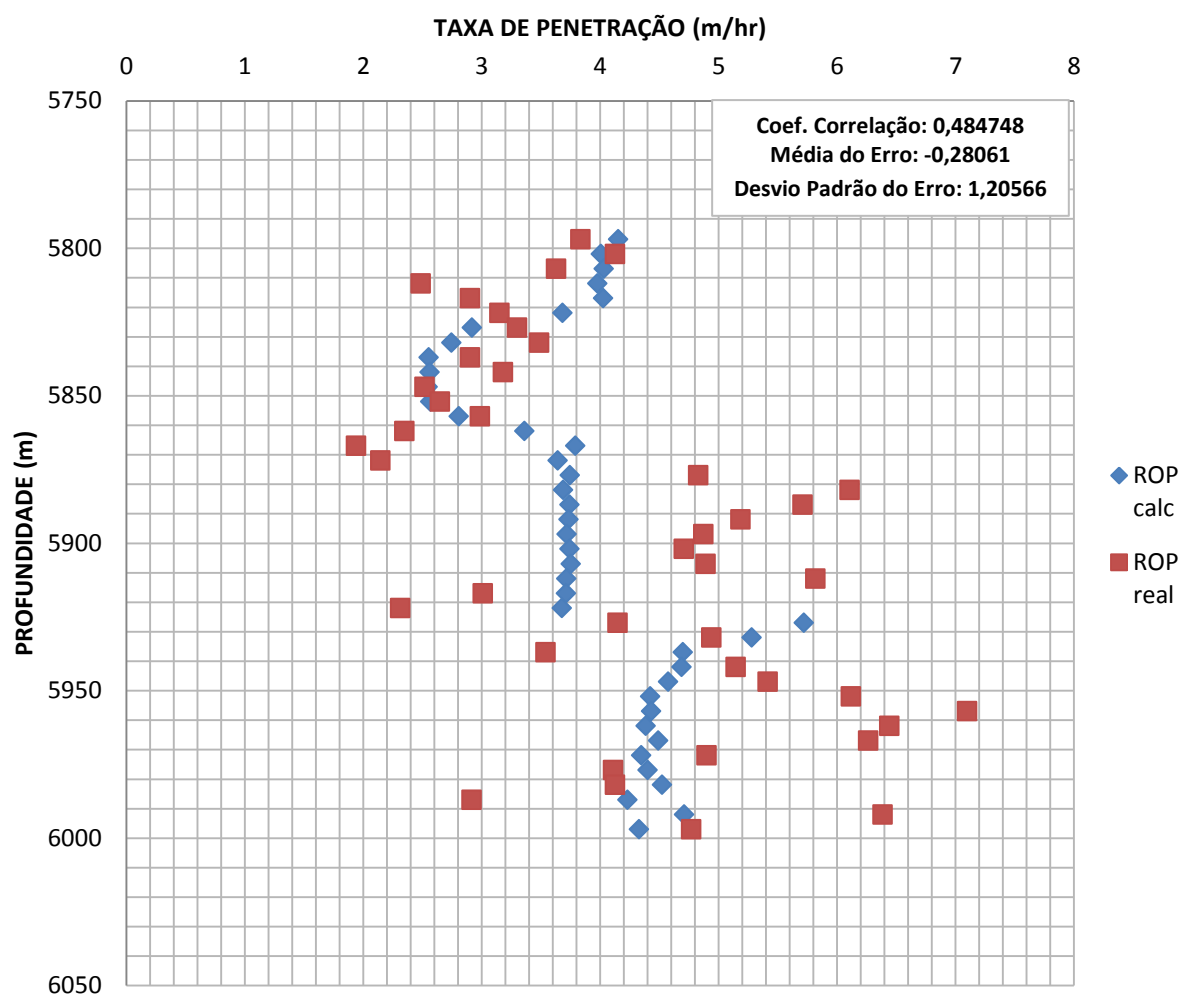


Figura 46 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço A, IGN, Fase de 8,5" a cada 5 metros

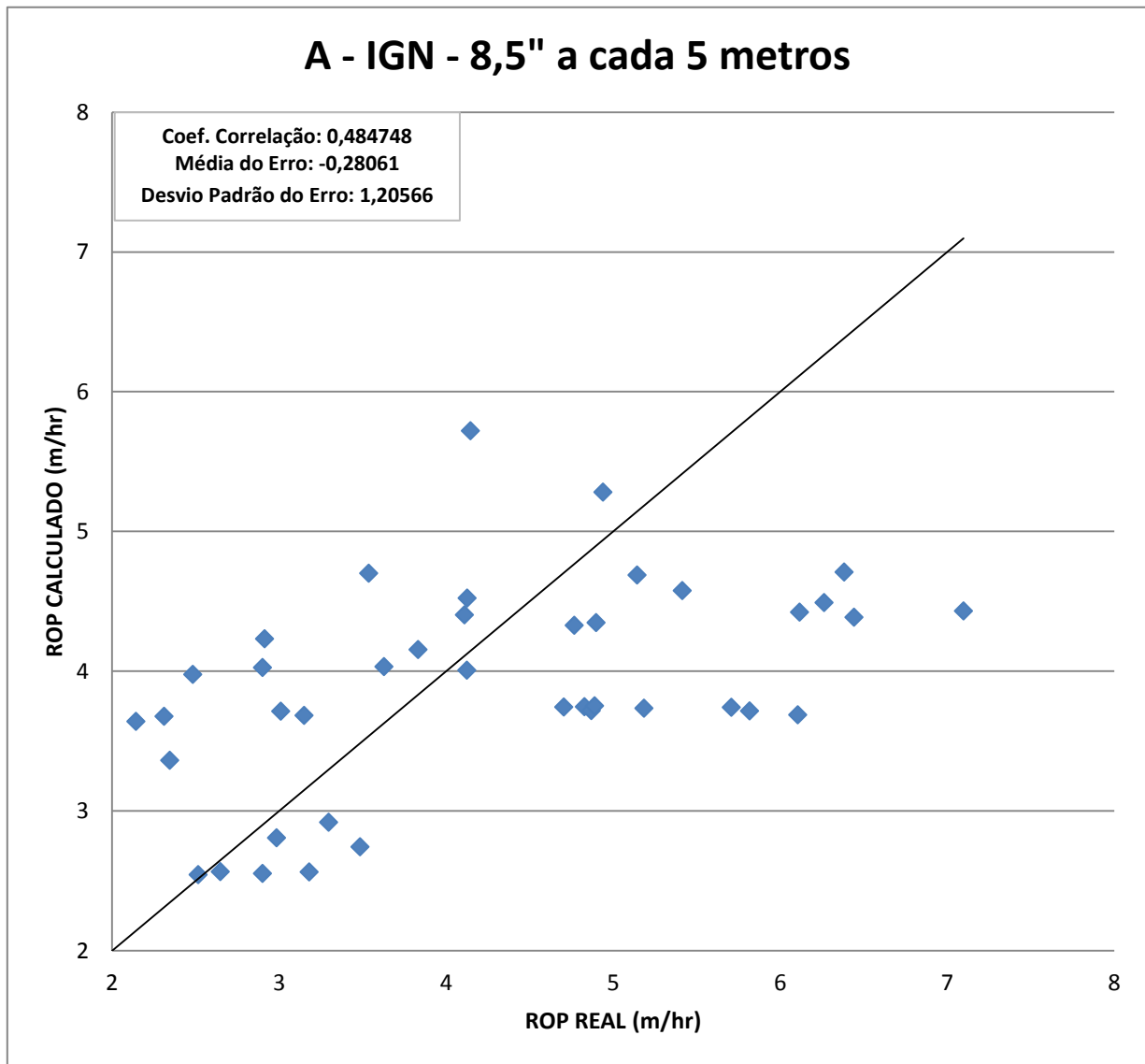


Figura 47- ROP real vs ROP calculado - Poço A - IGN - 8,5" a cada 5 metros

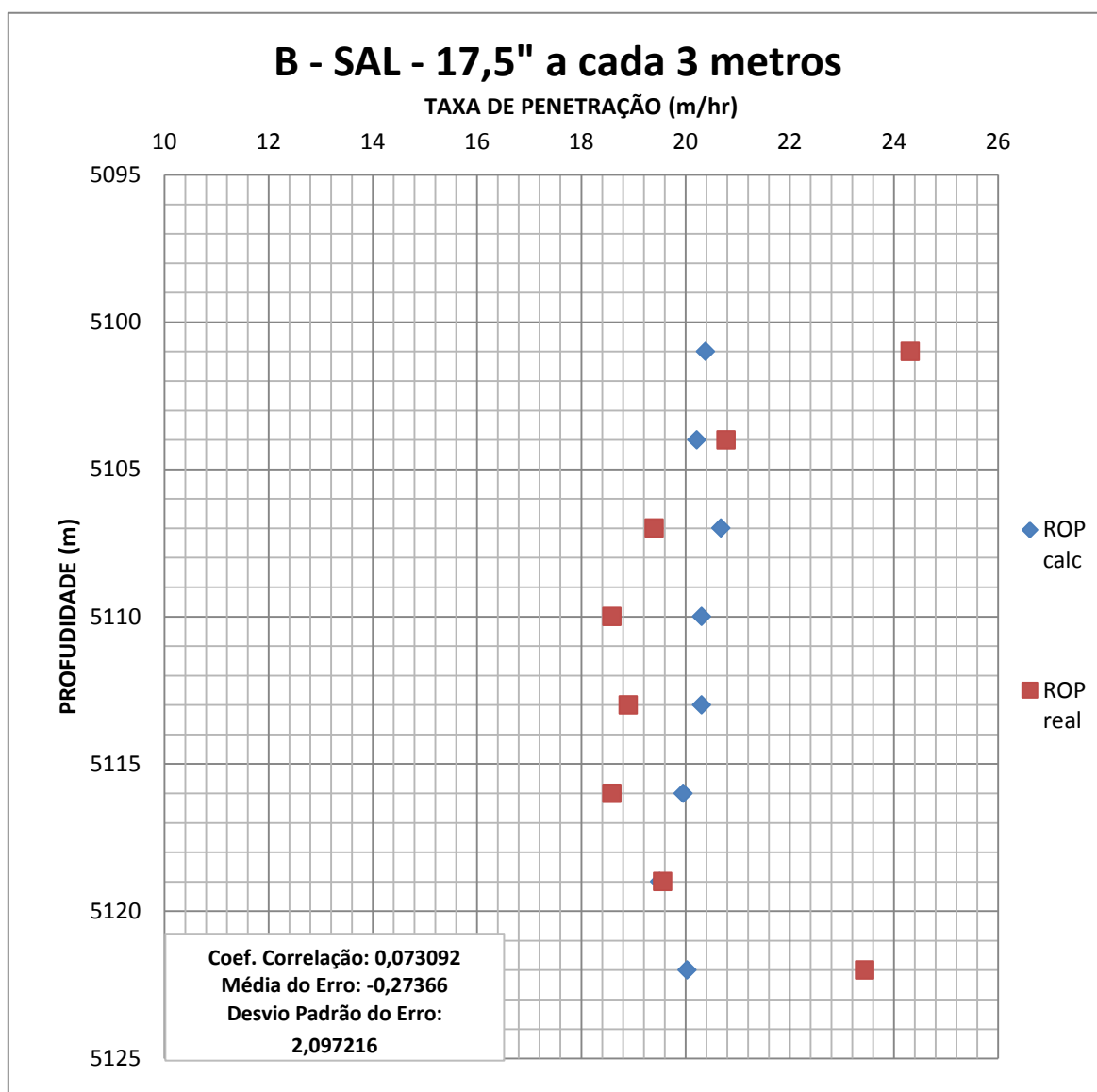


Figura 48 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço B, Sal, Fase de 17,5" a cada 5 metros

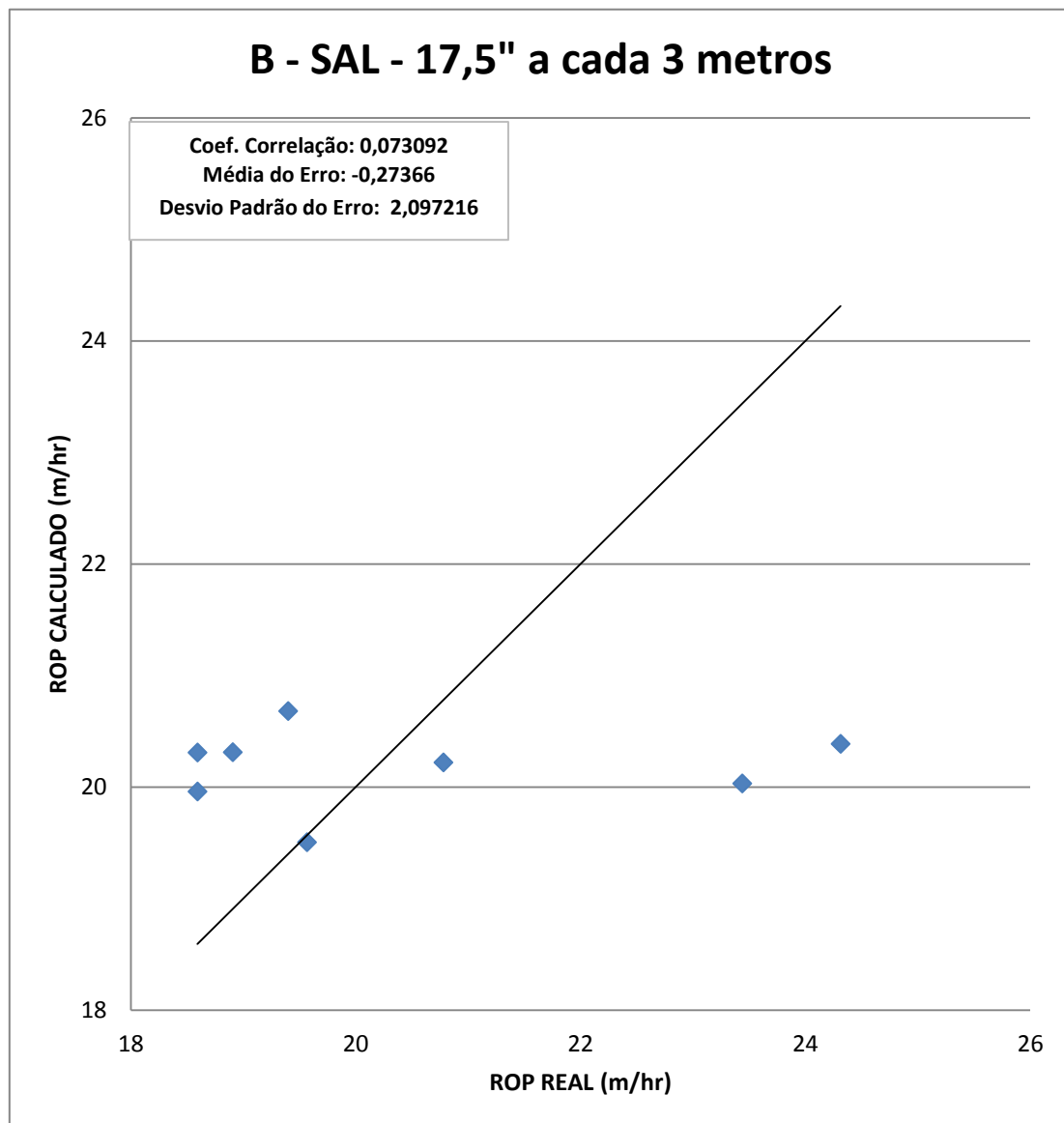


Figura 49 - ROP real vs ROP calculado - Poço B - Sal - 17,5" a cada 5 metros

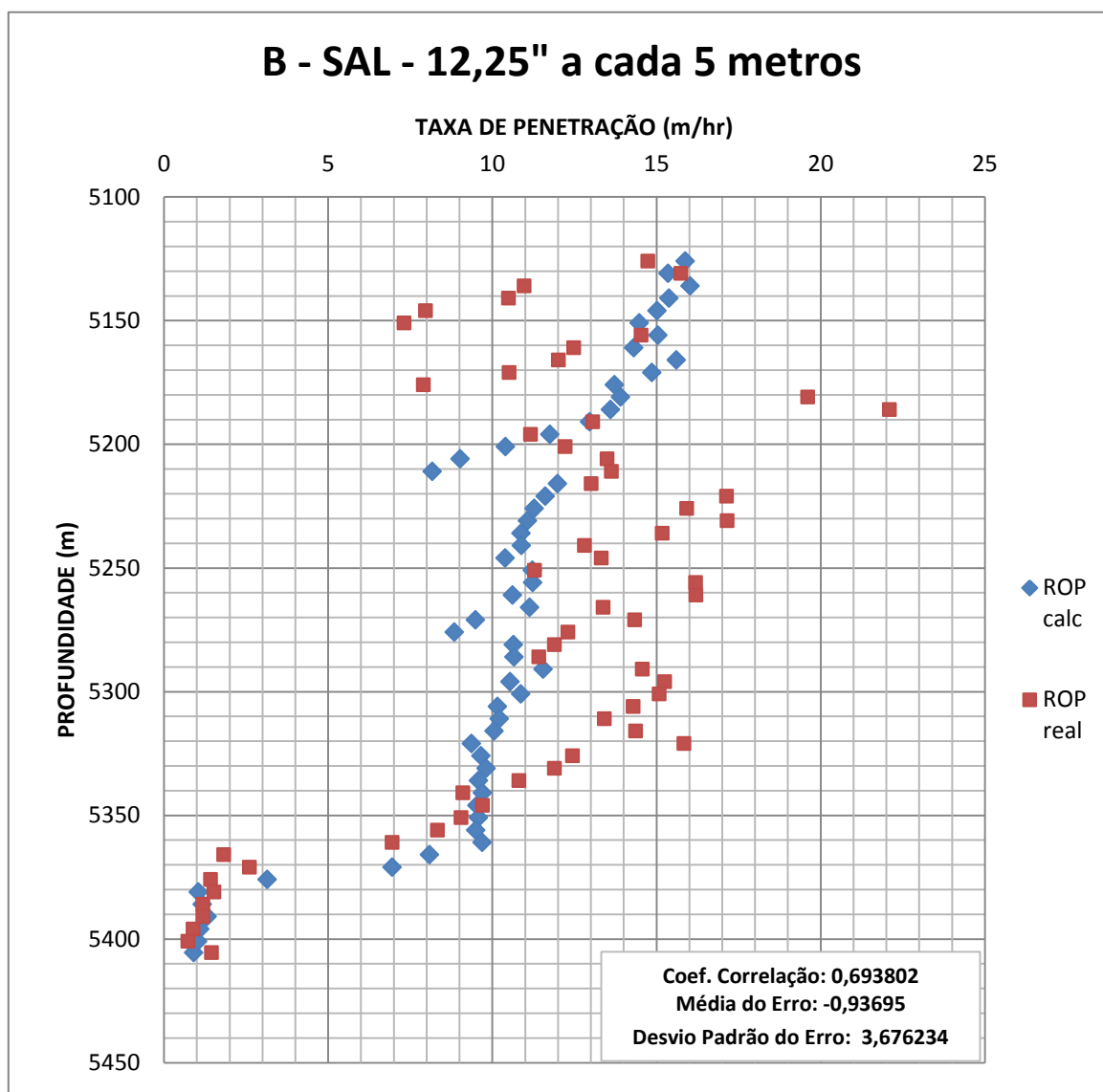


Figura 50 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço B, Sal, Fase de 12,25" a cada 5 metros

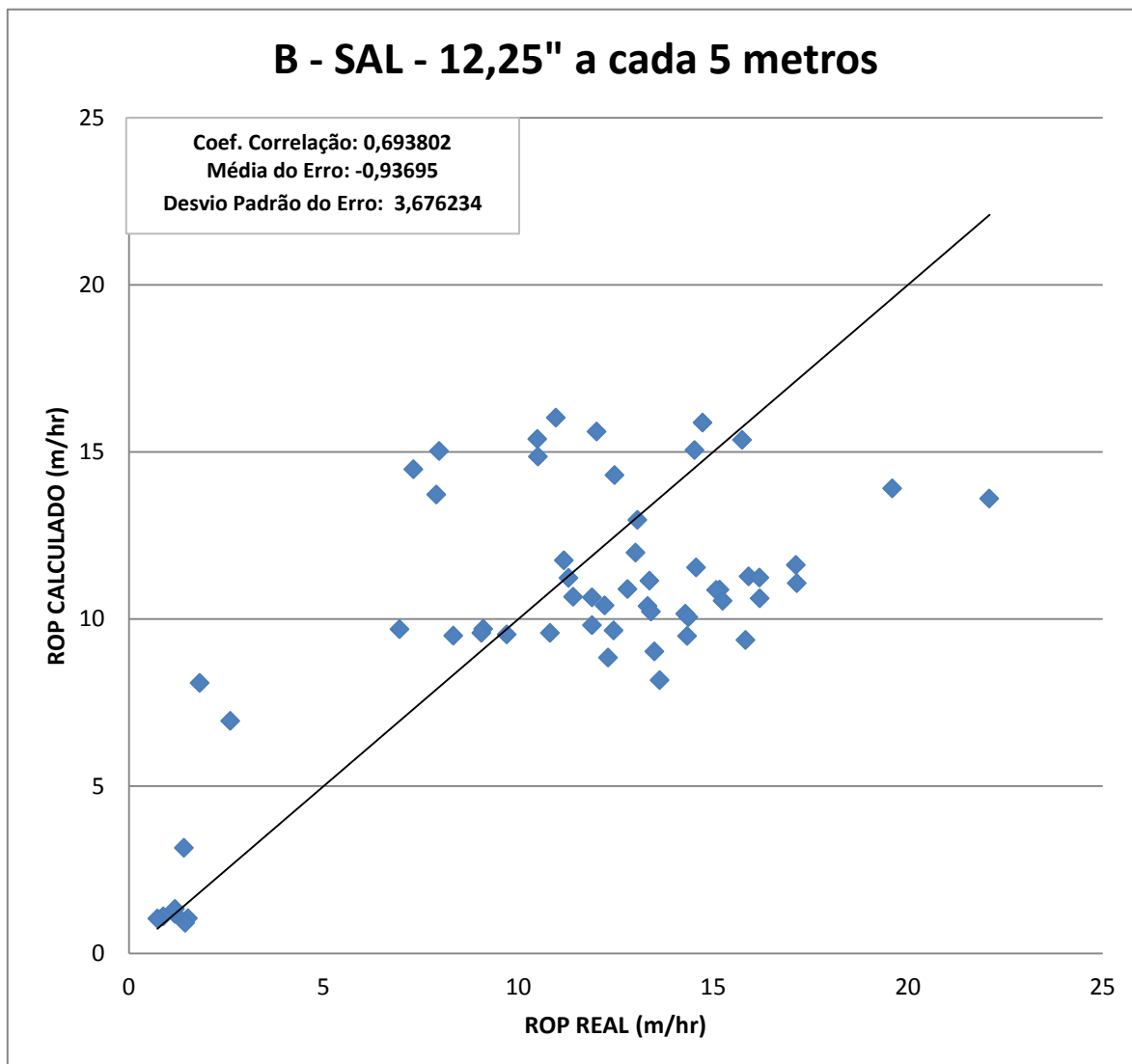


Figura 51 - ROP real vs ROP calculado - Poço B - Sal - 12,25" a cada 5 metros

6.4 Cálculo dos coeficientes do Poço C e resultados correspondentes

Uma vez estabelecidos os coeficientes b_i dos dois primeiros poços A e B, prosseguiu-se com o tratamento matemático do modelo, sendo então calculados os coeficientes do poço do terceiro poço (poço C) a ser verificado. O método adotado foi baseado no descrito em Ohara [5], apresentando cada um dos coeficientes b_i como sendo igual à média aritmética dos respectivos coeficientes b_i dos outros poços de correlação perfurados anteriormente na mesma área (poços A e B), como descrito na equação abaixo:

$$b_i = \frac{\sum_{k=1}^{n_p} b_{ik}}{n_p}$$

Equação 33 – Procedimento de cálculo dos parâmetros b_i do poço a ser verificado

onde b_{ik} é o coeficiente $i = (1, 2, \dots, 6)$ do poço de correlação k e n_p é o número de poços de correlações.

As Tabs.2, 3, 4 e 5 mostra os valores obtidos para os coeficientes dos poços A, B e C calculado.

Tabela 2 – Coeficientes b1 a b6 dos Poços A e B e os coeficientes calculados para C para o Sal na fase de 17,5"

SAL – FASE DE 17,5"			
	Poço A	Poço B	Poço C
b1	-1,308720	-4,769290	-3,039005
b2	0,064053	-0,045050	0,009501
b3	3,000000	3,000000	3,000000
b4	-2,132820	-115,135000	-58,633910
b5	0,713806	0,093096	0,403451
b6	2,000000	7,235180	4,617590

Tabela 3 – Coeficientes b1 a b6 dos Poços A e B e os coeficientes calculados para C para o Sal na fase de 12,25”

SAL – FASE DE 12,25”			
	Poço A	Poço B	Poço C
b1	-3,580740	-5,961020	-4,770880
b2	0,053397	-0,751656	-0,349130
b3	1,000000	4,000000	2,500000
b4	1,289050	4,256480	2,772765
b5	0,458770	0,692041	0,575406
b6	2,000000	35,025500	18,512750

Tabela 4 – Coeficientes b1 a b6 dos Poços A e B e os coeficientes calculados para C para o SAG na fase de 12,25”

SAG – FASE DE 8,5”			
	Poço A	Poço B	Poço C
b1	-4,901180	0,000000	-2,450590
b2	0,312826	0,000000	0,156413
b3	3,000000	0,000000	1,500000
b4	2,860010	0,000000	1,430005
b5	0,247967	0,000000	0,123984
b6	3,000000	0,000000	1,500000

Tabela 5 – Coeficientes b1 a b6 dos Poços A e B e os coeficientes calculados para C para o o embasamento ígneo na fase de 8,5”

IGN – FASE DE 8,5”			
	Poço A	Poço B	Poço C
b1	-7,181010	0,000000	-3,590505
b2	0,181374	0,000000	0,090687
b3	40,189100	0,000000	20,094550
b4	79,132300	0,000000	39,566150
b5	0,005750	0,000000	0,002875
b6	6,191500	0,000000	3,095750

6.5 Resultados da modelagem do ROP para o Poço C com coeficientes calculados e da filtragem aplicada

De posse coeficientes b_i calculados para o Poço C, foi determinado o ROP metro a metro para cada pacote litológico nesse poço através da substituição desses coeficientes e dos dados gerados fornecidos pelo Sistema de Monitoração de Sonda, para posterior verificação do ROP real e o obtido pelo modelo (Anexo C e Figs. 52 a 59). As informações da sonda são usadas no cálculo dos parâmetros X_j , os quais são substituídos conjuntamente com os coeficientes b_i na Eq. 23. Percebe-se novamente uma grande dispersão dos dados de taxa de penetração reais do Poço C, obtidos através do *mud logging*. Um procedimento de filtragem semelhante ao realizado para os outros poços de correlação também foi adotado. As Figs.60 a 64 mostram graficamente os resultados da filtragem executada.

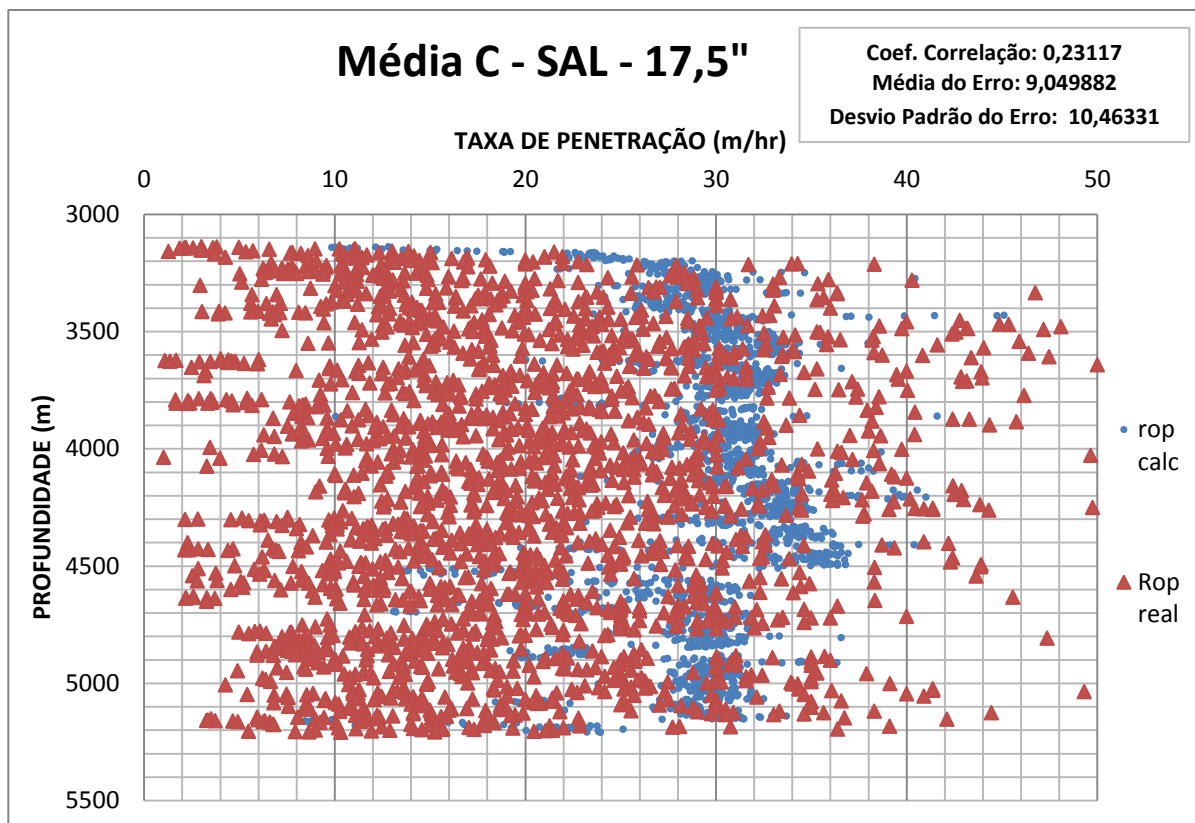


Figura 52 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço C, Sal, Fase de 17,5"

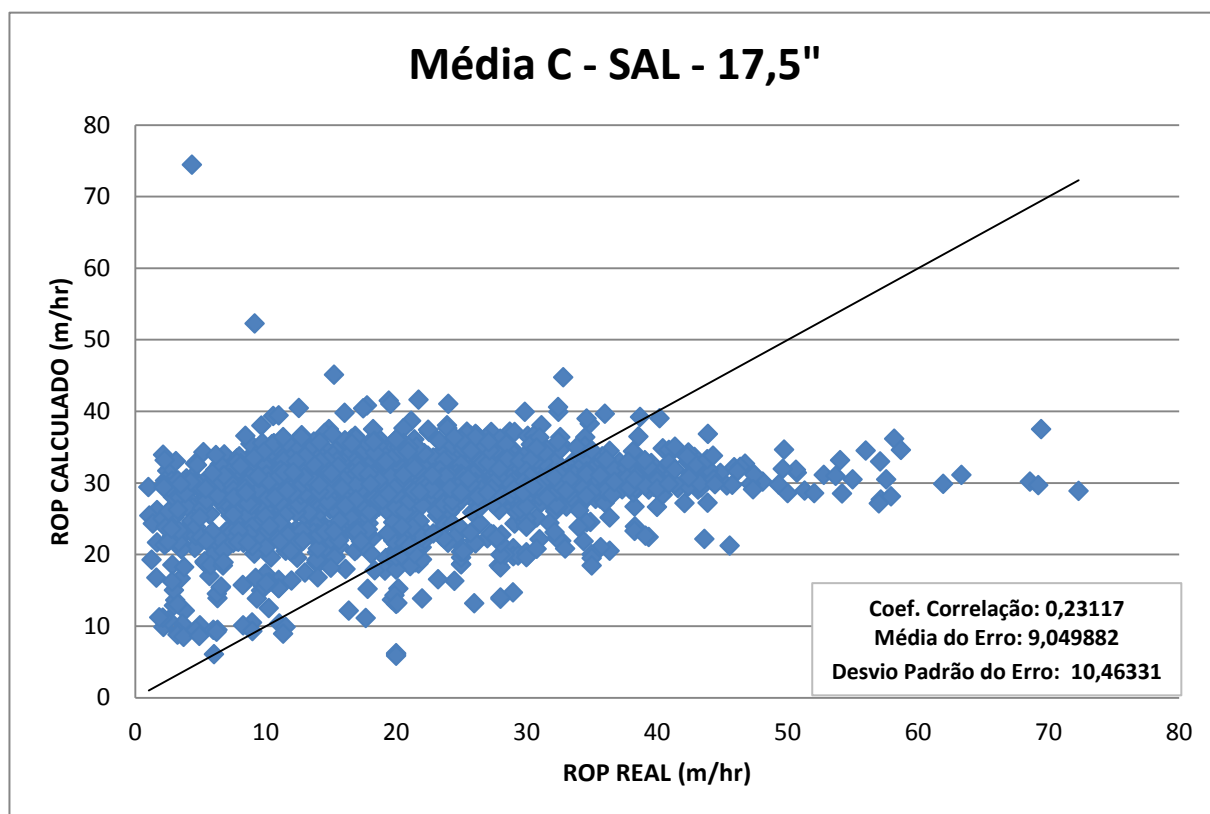


Figura 53 - ROP real vs ROP calculado - Poço C - Sal - 17,5"

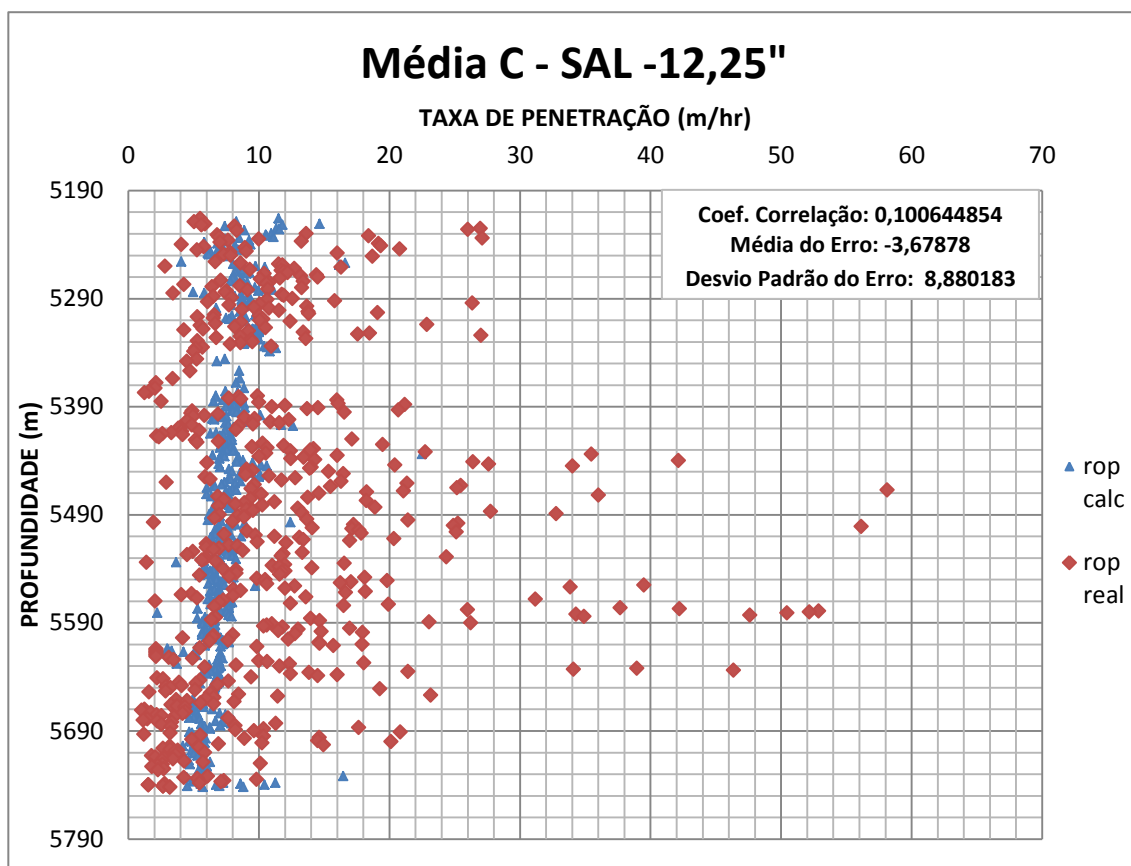


Figura 55 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço C - Sal - 12,25"

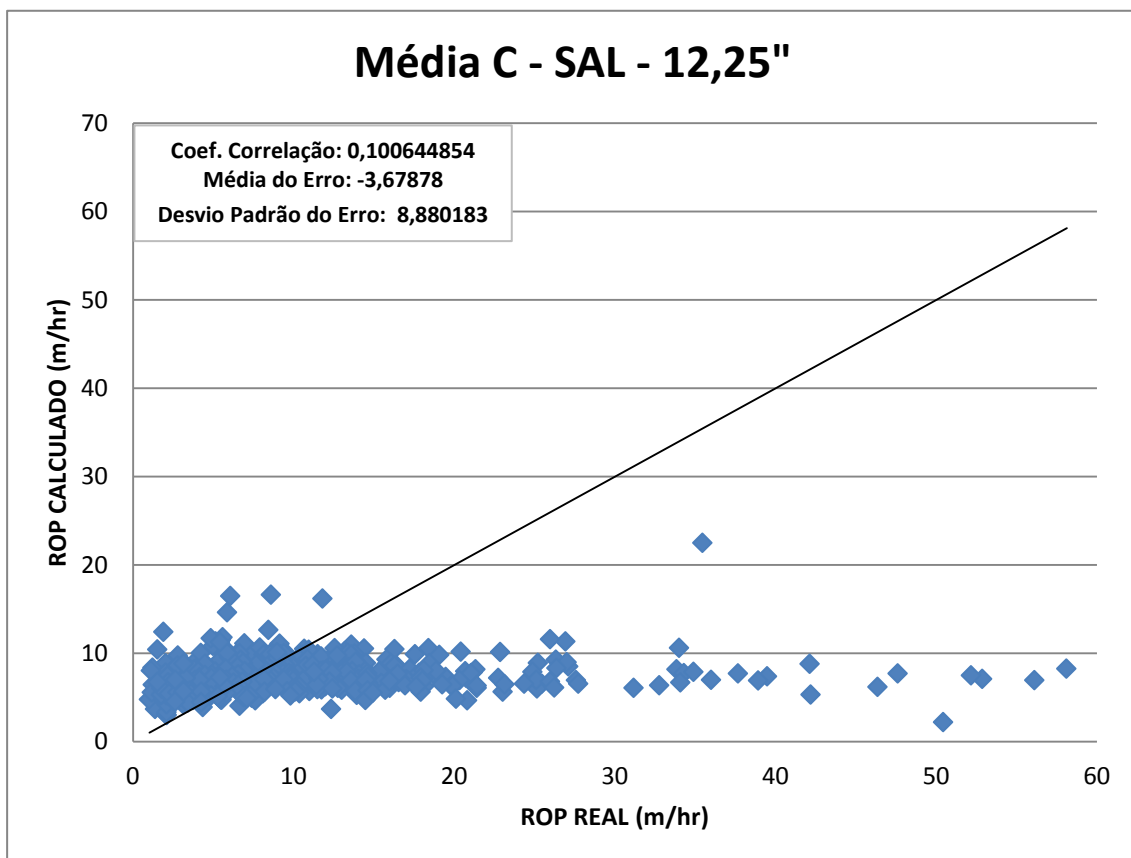


Figura 54 - ROP real vs ROP calculado - Poço C - Sal - 12,25"

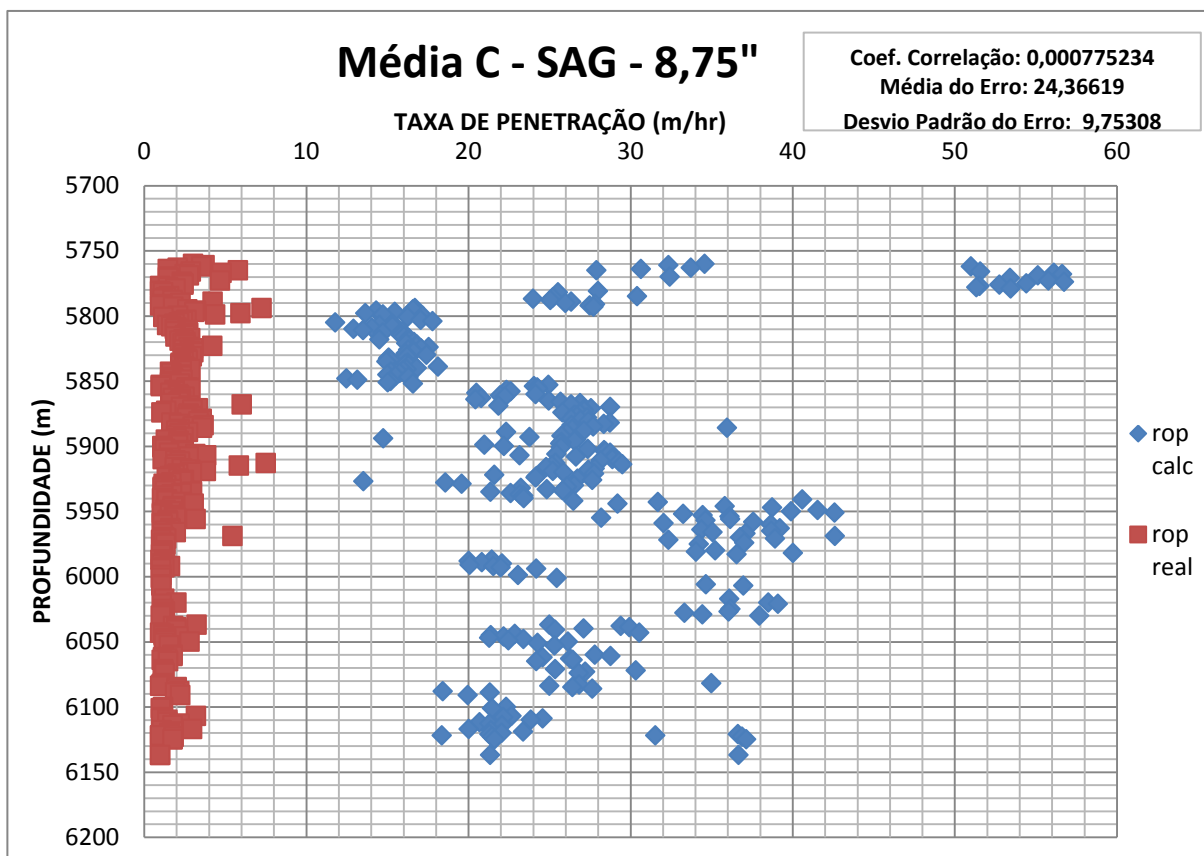


Figura 57 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço C, SAG, Fase de 8,75"

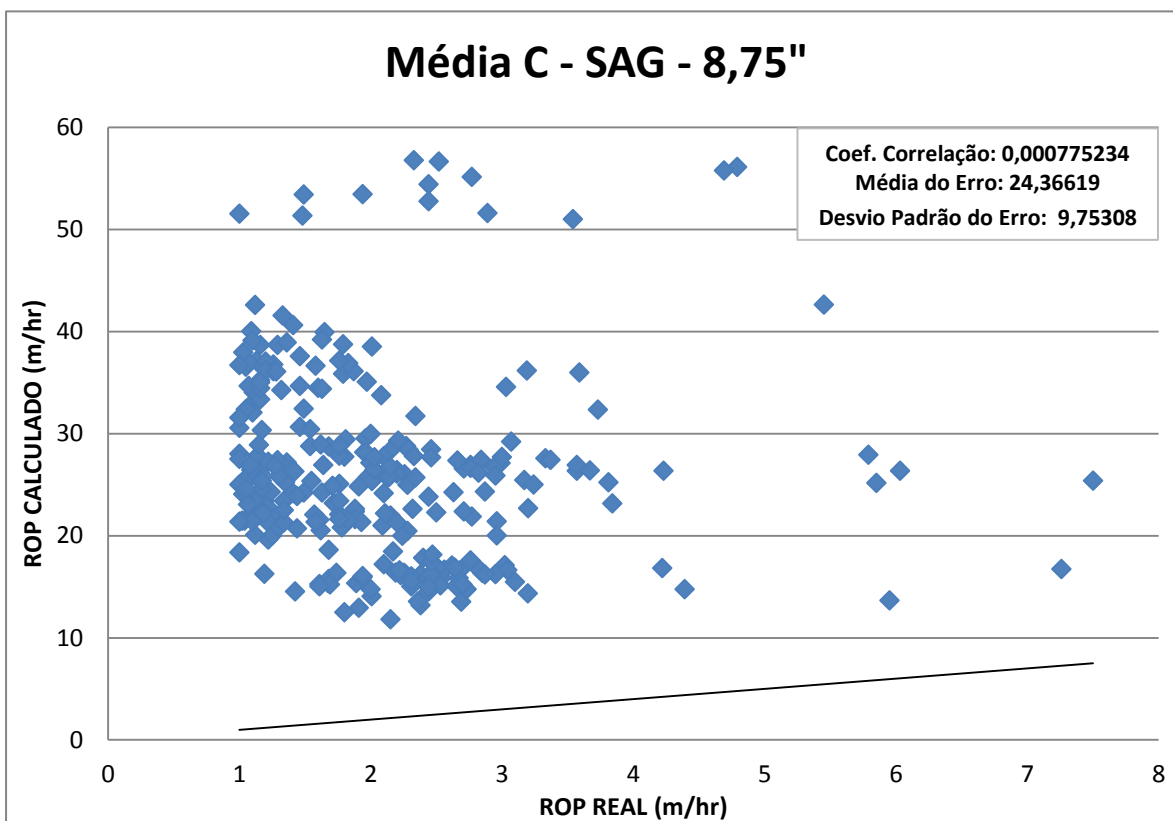


Figura 56 - ROP real vs ROP calculado - Poço C - SAG - 8,75"

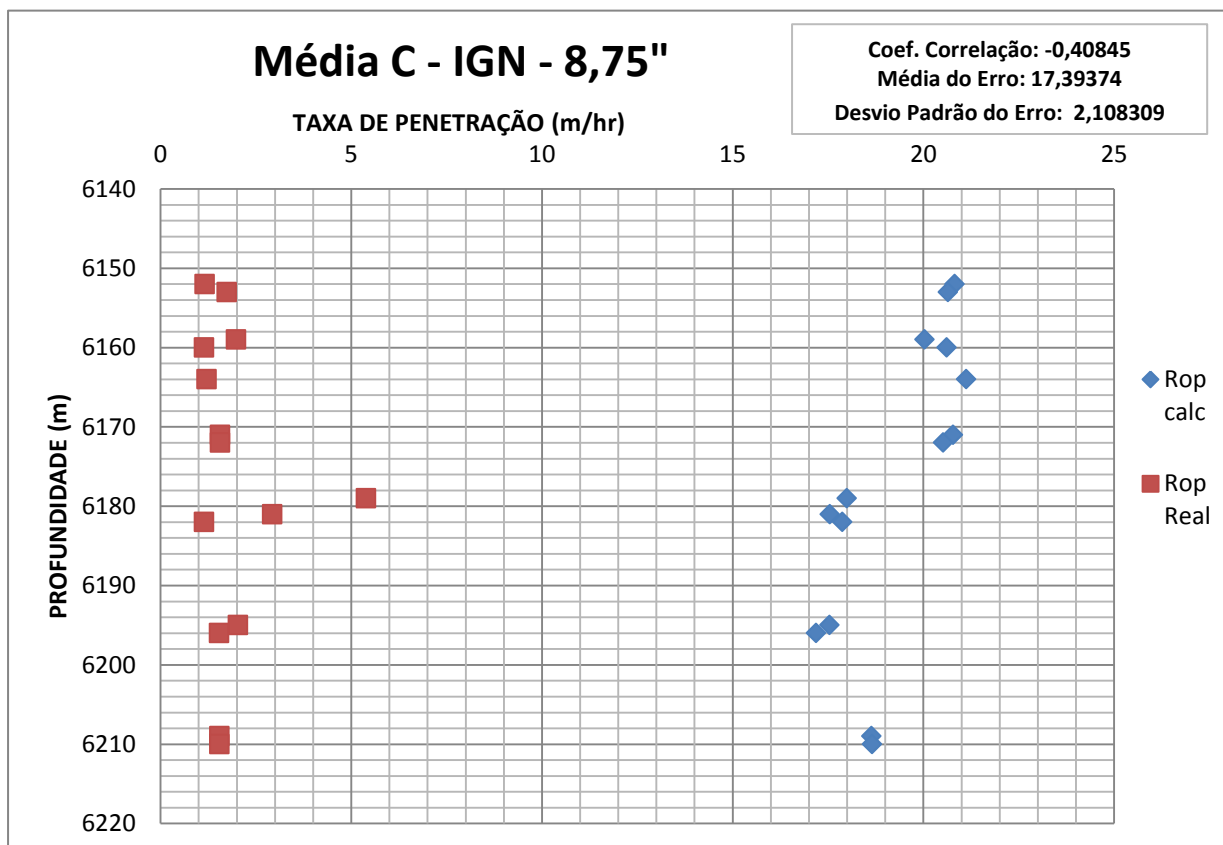


Figura 58 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço C, IGN, Fase de 8,75"

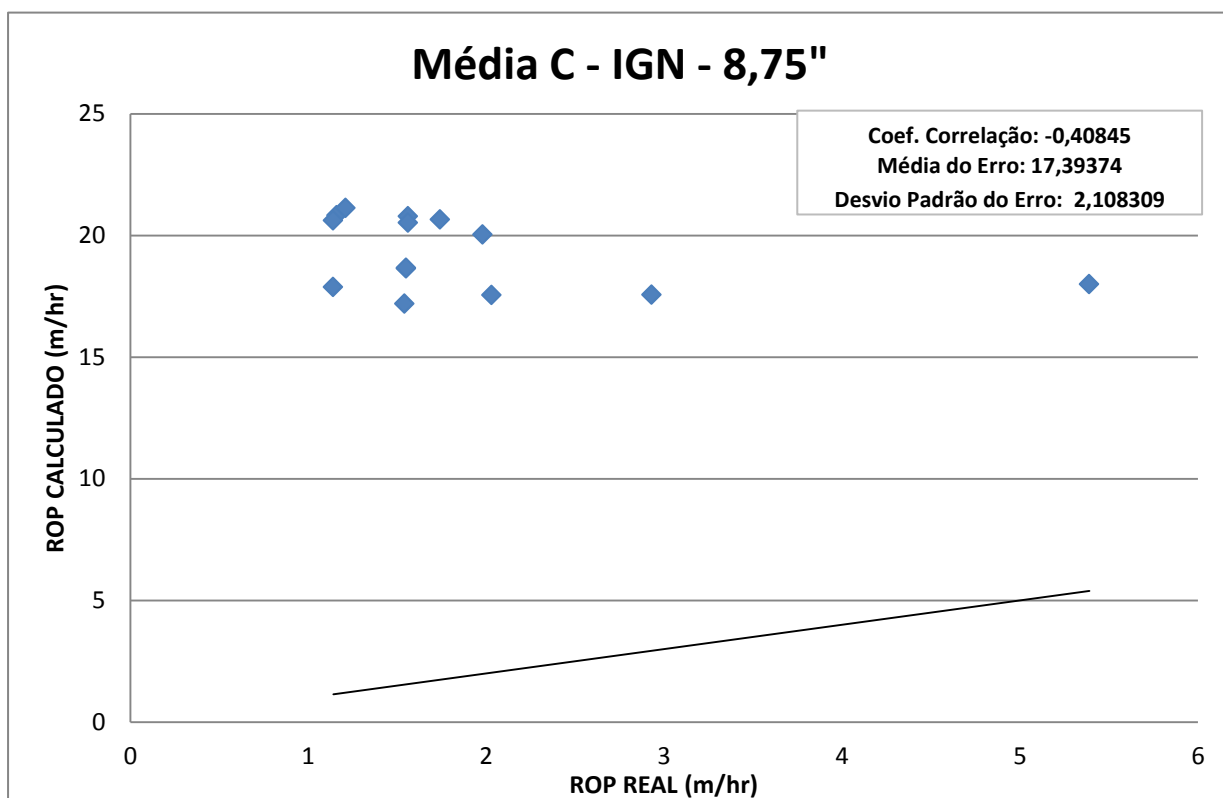


Figura 59 - ROP real vs ROP calculado - Poço C - IGN - 8,75"

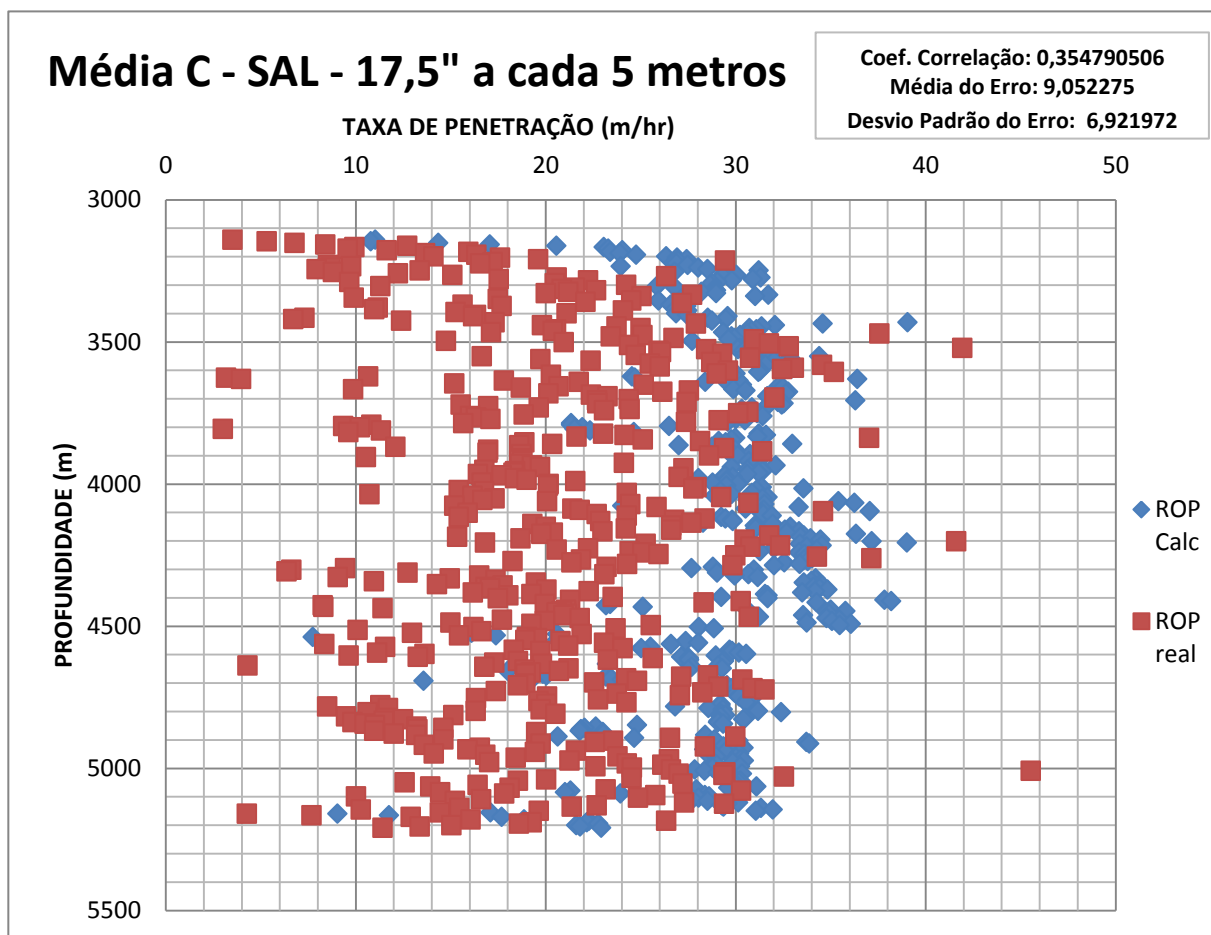


Figura 60 – Taxa de Penetração vs Profundidade – Poço C, Sal, Fase de 17,5" a cada 5 metros

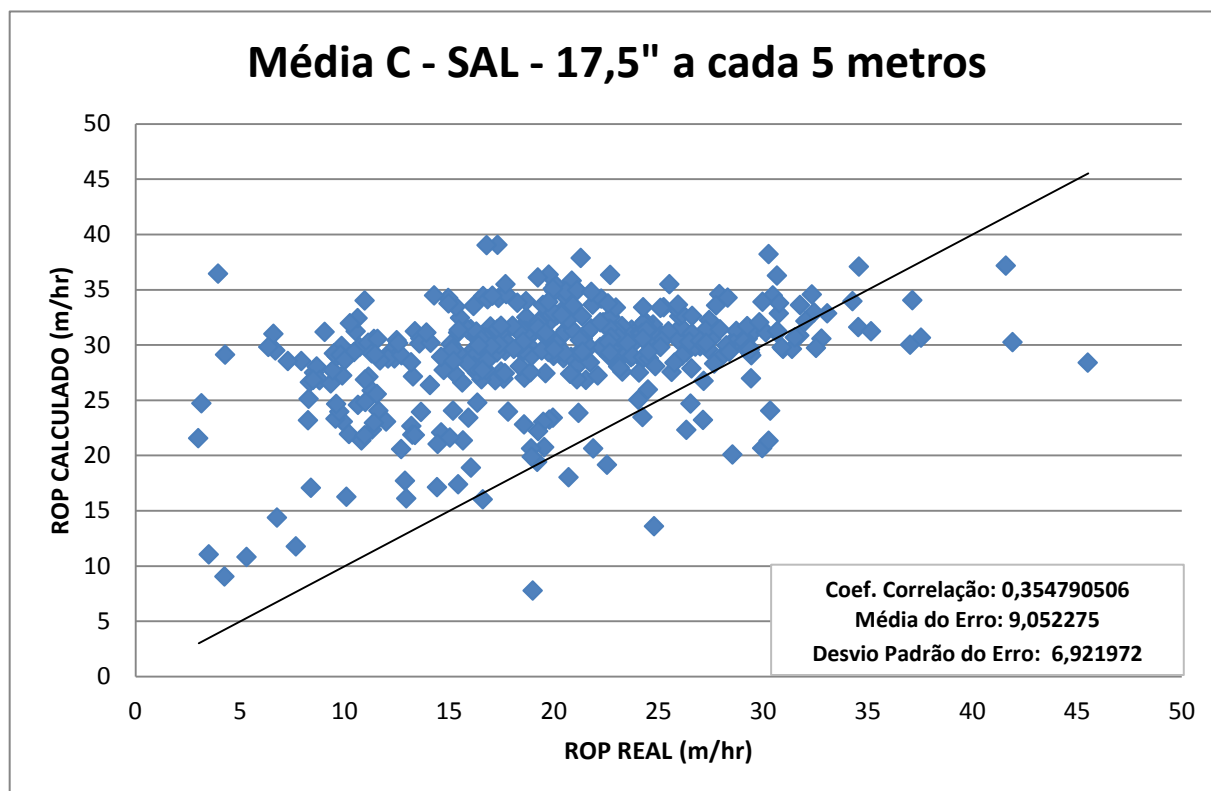


Figura 61 - ROP real vs ROP calculado - Poço C - Sal - 17,5"

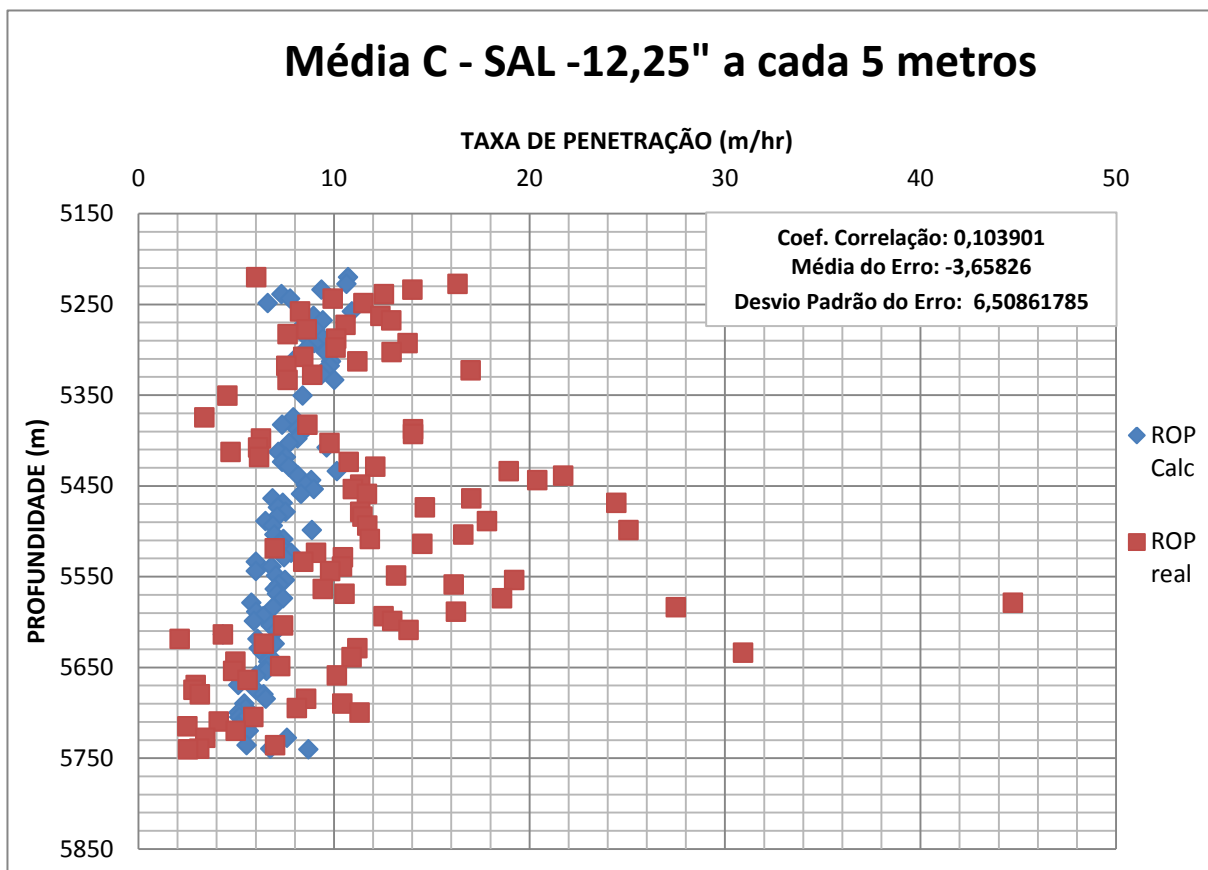


Figura 62 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço C, Sal, Fase de 12,25"

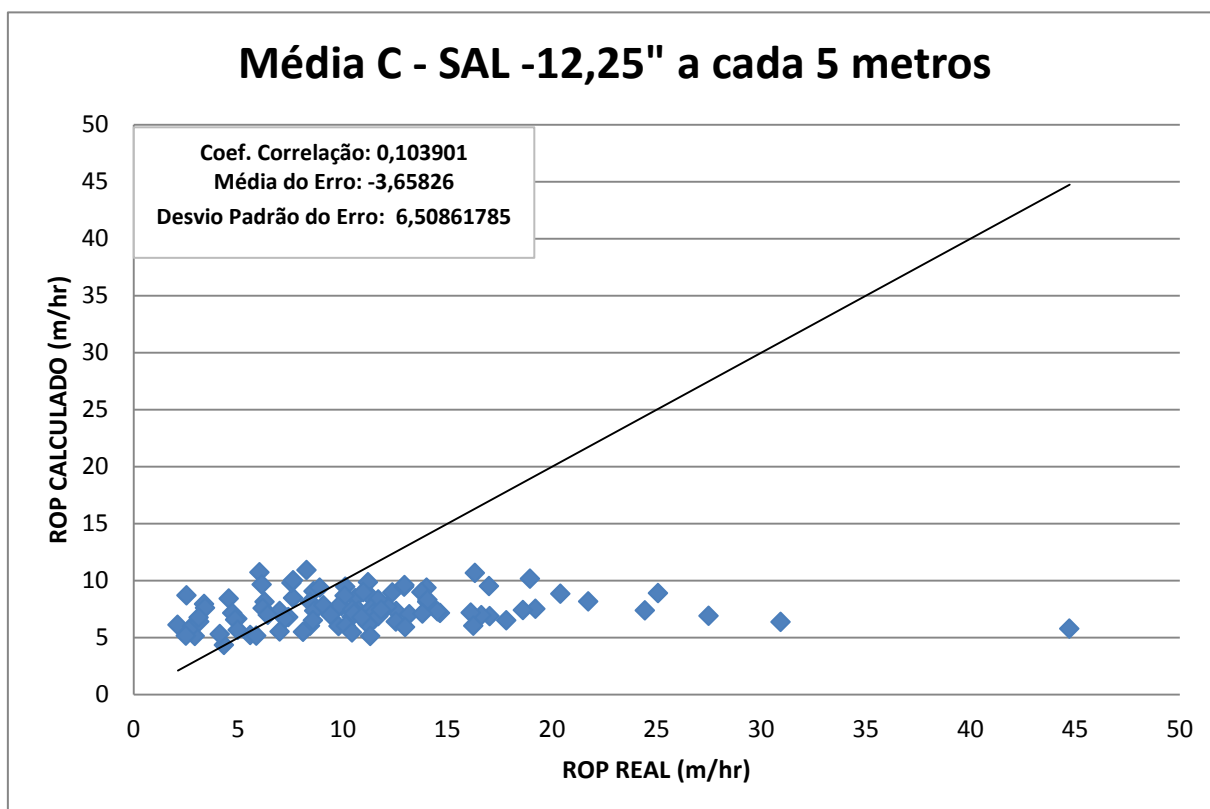


Figura 63 - ROP real vs ROP calculado - Poço C, Sal, Fase de 12,25"

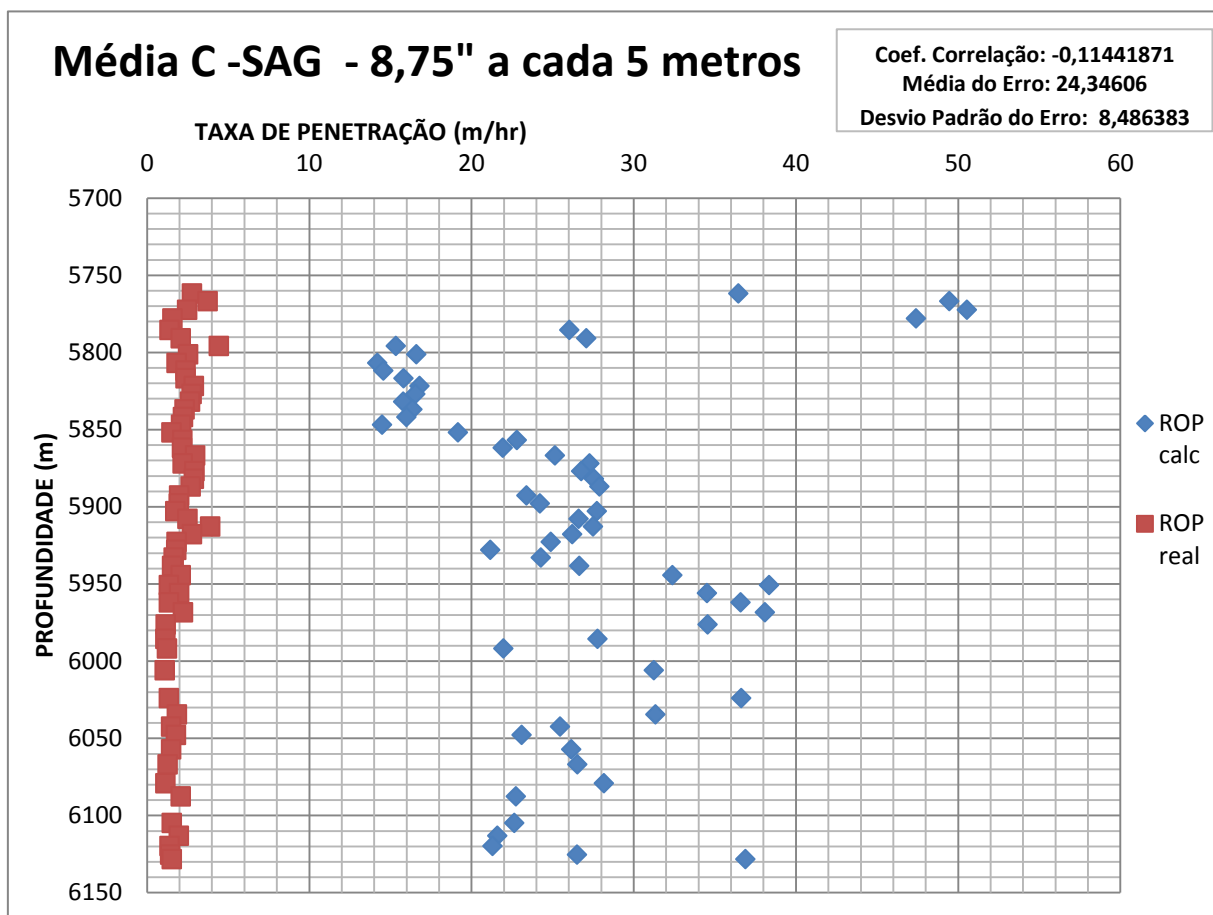


Figura 65 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço C, SAG, Fase de 8,75"

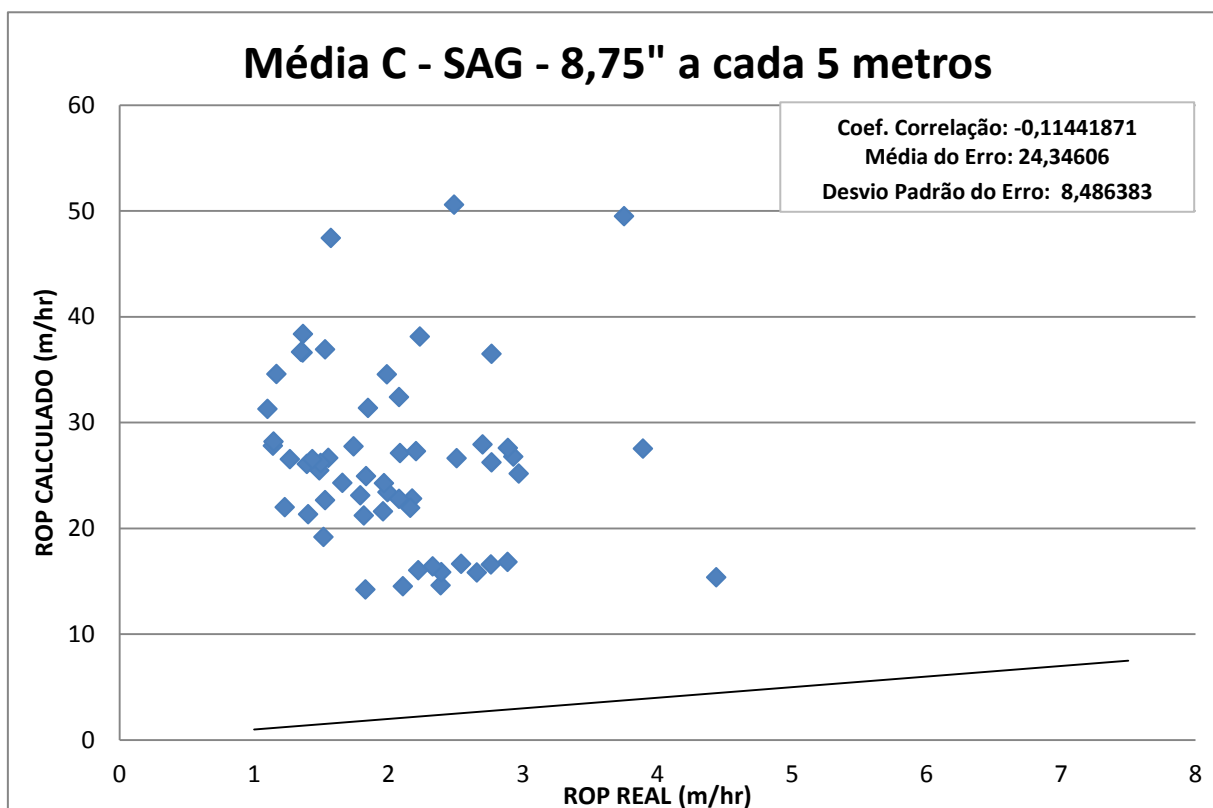


Figura 64 - ROP real vs ROP calculado - Poço C, SAG, Fase de 8,75"

7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Como salientado na seção 4.7, o modelo de perfuração de Ohara [5] é caracterizado pela execução de regressões múltiplas a partir de dados metro a metro fornecidos pelo Sistema de Monitoração de sonda. Dessa forma, o resultado da modelagem é intrinsecamente acoplado à qualidade das informações adquiridas pelo sistema de *mud logging*, o qual registra os valores de diversos parâmetros de maneira instantânea. A qualidade do conjunto de informações a cada metro é influenciada fortemente não somente pela precisão dos sensores e a confiabilidade dos transmissores, como também pelas condições do ambiente de fundo de poço no qual o BHA se encontra. Isso explica, por exemplo, leituras muito baixas de WOB, e até mesmo negativas, como em algumas leituras de RPM. A causa física desses problemas pode possivelmente estar atreladas à processos de vibração da coluna como o *bit bounce* – movimento percussivo da coluna – e à retenção temporária da broca por razão de *stick-slip* – fenômeno que acarreta diminuição ou até mesmo a rotação contrária da broca. Assim, a instantaneidade aliada a uma alta frequência de aquisição de dados possibilita a captura de situações consideradas não ideais do ponto de vista das premissas características ao modelo, fazendo com que o valor medido e seu respectivo significado físico dificultem o alcance de um maior grau da representatividade da realidade pelo modelo proposto.

7.1 Poços A e B

Ao se comparar os gráficos de cada fase e cada litologia dos poços A e B com aqueles respectivos ao processo de filtragem em intervalos de cinco (ou três, no caso da fase de 17,5” do poço B) metros, constata-se uma melhora na correlação de todos os intervalos do poços A e B (Tabs. 6 e 7), excetuando-se exatamente a fase de 17,5” deste último poço. Isto se deve a natureza do pequeno conjunto de dados passível de análise para essa fase, sendo o ROP medido caracterizado por variações muito bruscas em alguns pontos de medição. Dessa forma, o peso desses valores mais destacados em um espaço amostral pequeno conduz a um coeficiente de correlação mais baixo.

Entretanto, todos os outros casos apresentam indícios da real possibilidade de aplicação do modelo de Ohara para a verificação das outras fases investigadas em ambos os poços. É perceptível a indicação de que a taxa de penetração modelada

como acompanha a tendência da taxa de penetração real, de modo que a correlação do modelo com a realidade sofre forte influência da qualidade dos dados medidos.

Tabela 6 – Coeficientes de correlação m/m vs 5m/5m do Poço A

	Coef. de Correlação (metro a metro)	Coef. de Correlação (a cada 5 metros)
Sal – 17,5”	0,53	0,70
Sal – 12,25”	0,13	0,20
SAG – 12,25”	0,37	0,49
Ígnea – 8,5”	0,35	0,48

Tabela 7 - Coeficientes de correlação m/m vs 5m/5m do Poço B

	Coef. de Correlação (metro a metro)	Coef. de Correlação (a cada 5 metros)
Sal – 17,5”	0,16	0,07
Sal – 12,25”	0,61	0,69

7.2 Poço C

Ao se analisar os gráficos respectivos à taxa de penetração obtida através da simulação com utilização dos coeficientes do poço C determinados pela Eq. 34, é constatada uma grande diferença em relação à taxa real fornecida pelo *mud logging*, principalmente nas fases de 8,75”, nas litologias de SAG e embasamento ígneo. Dois possíveis fatores para a grande diferença apresentada são a diferença da de 0,25” no diâmetro de broca entre o utilizado no poço C e o utilizado nos poços A e B; e também

a ausência de qualquer representatividade dos coeficientes do poço B no cálculo dos coeficientes do poço C, uma vez que para as duas litologias destacadas, não foi possível a realização de análise em B. Assim, para esses dois grupos litológicos, não se aconselha a utilização do referido modelo levando-se em conta tão somente os dados de sonda disponíveis para a simulação.

Contudo, da mesma forma que para os poços A e B, a modelagem da taxa de penetração para o poço C também é influenciada pela qualidade dos dados reais. A fig. 52 ajuda a ilustrar a dificuldade do modelo de prever a taxa de penetração a partir dos dados de campo obtidos, uma vez que os mesmos não apresentam qualquer padrão de comportamento passível de identificação em primeira análise, característica esta decorrente da grande dispersão dos pontos correspondentes às leituras de ROP da sonda. A aplicação da filtragem de dados a cada cinco metros proporciona uma melhora na correlação entre ROP modelado e o medido para a fase de 17,5" em litologia salina, não sendo tão significativa, porém, na fase de 12,25" da mesma litologia.

De maneira a verificar quão próximos dos coeficientes característicos do poço C estariam os coeficientes calculados pela Eq. 34, foi realizada a regressão descrita nas seções 6.1 e 6.2 para a fase de 17,5" desse poço. Com isso, obteve-se o valor relativo a cada um dos seis coeficientes característicos do poço verificado, sendo possível, então, a comparação (Tab. 8). A análise dos dois diferentes grupos de coeficientes obtidos permite a verificação de uma paridade entre ambos, ainda que os calculados pela Eq. 34 sejam função de apenas dois poços (A e B). Todavia, o parâmetro b_4 obtido pela equação referida difere em uma ordem de grandeza do mesmo parâmetro obtido via regressão múltipla, sendo considerada plausível a hipótese de que juntamente com a qualidade dos dados, tal diferença seja também responsável pela discrepância encontrada entre o ROP modelado e ROP real para essa fase (Figs. 52,53,66 e 67).

Logo, a partir da análise global dos resultados e das hipóteses consideradas ao longo da mesma, verifica-se a aplicabilidade do modelo de perfuração descrito por Ohara [5] para a taxa de penetração em tempo real em poços do Pré-Sal brasileiro. Além disso, é ressaltada uma vez mais a necessidade de utilização de maiores e melhores conjuntos de dados de campo – maior número de poços e melhores informações de *mud logging* – para a entrada de informações no modelo, objetivando assim a melhoria do acoplamento dos dados modelados com os reais.

Tabela 8 - Comparativo entre os coeficientes b_i do poço C, Sal, Fase de 17,5"

	Coeficiente b_i calculado (Eq. 34)	Coeficiente b_i característico (Regressão Múltipla)
b_1	-3,039005	-2,97196
b_2	0,009501	0,155842
b_3	3,000000	4,00000
b_4	-58,633910	-5,87379
b_5	0,403451	0,276737
b_6	4,617590	3,00000

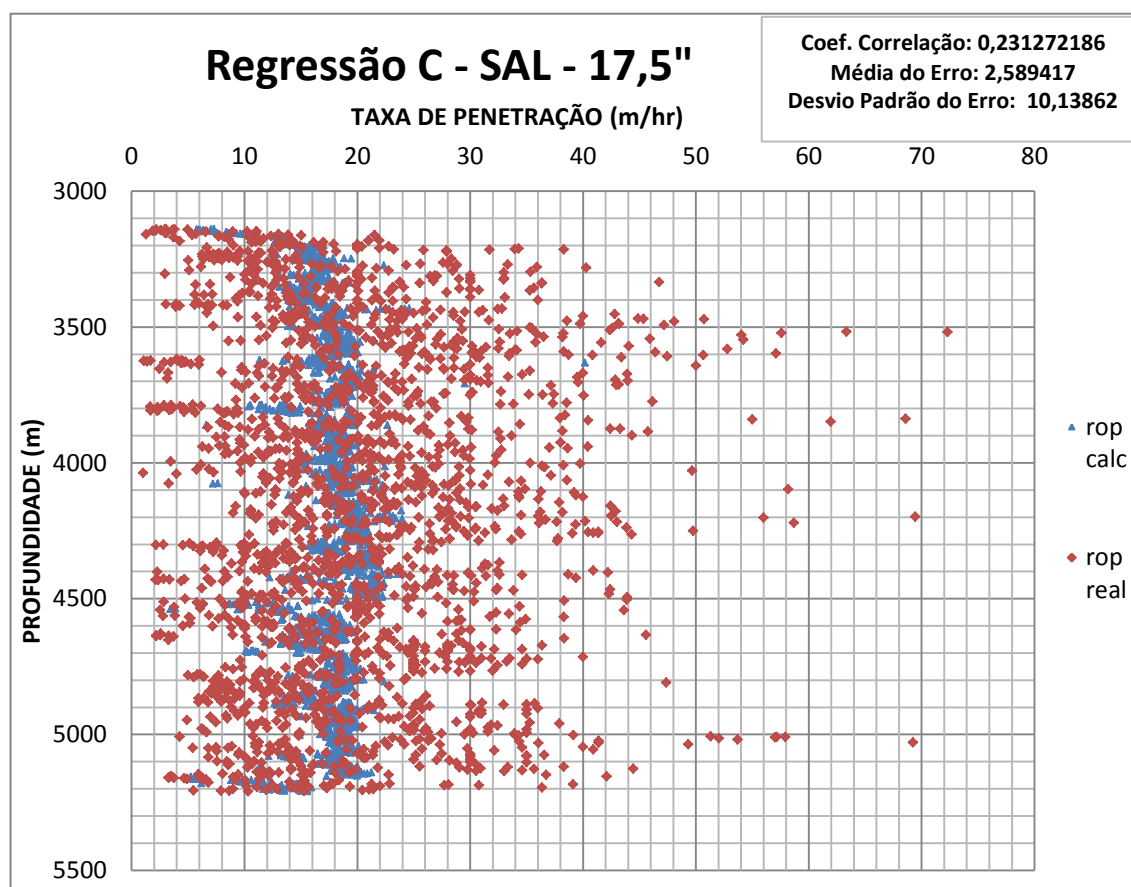


Figura 66 - Taxa de Penetração vs Profundidade - Poço C, Sal, Fase 17,5" a partir da regressão múltipla

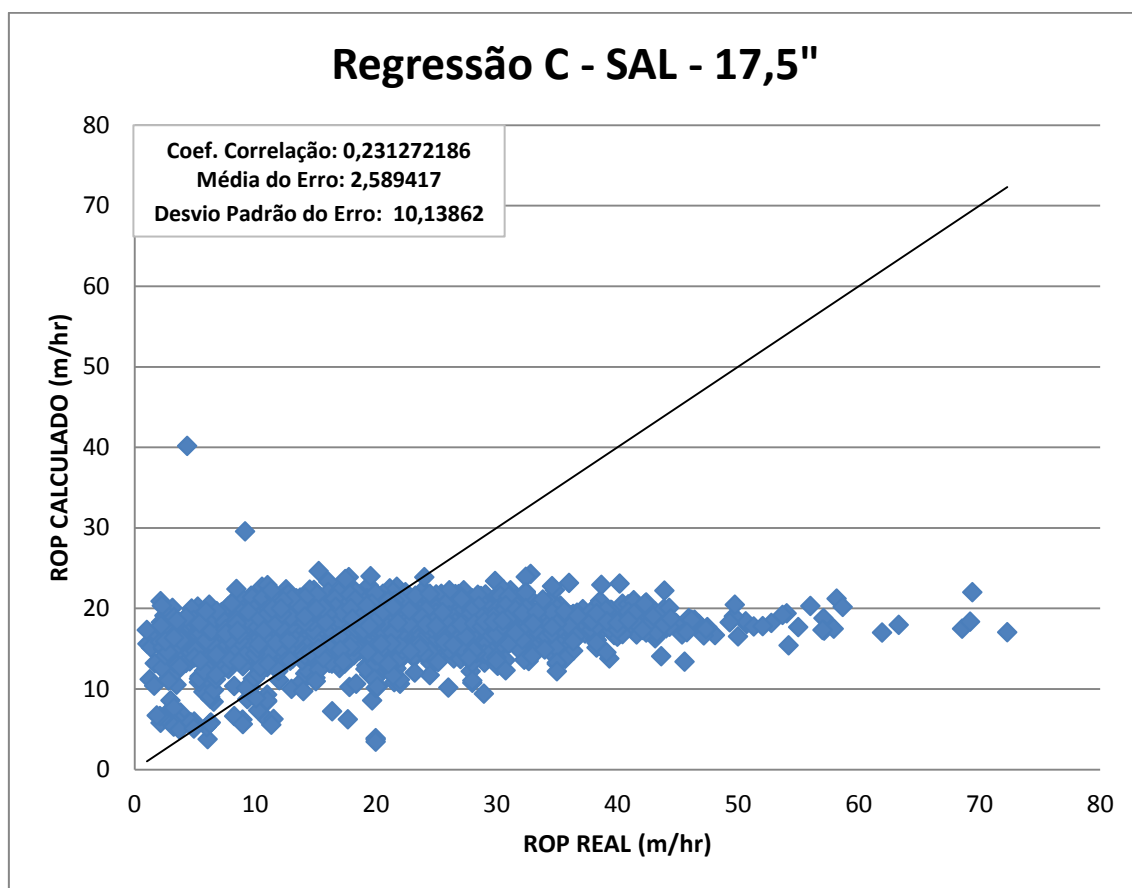


Figura 67 - ROP real vs ROP calculado – Poço C, Sal, Fase de 17,5" a partir da regressão múltipla

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. YERGIN, D., **O Petróleo: Uma história mundial de conquistas, poder e dinheiro**. 3e. São Paulo, Paz e Terra, 2010.
- [2]. JORNAL O GLOBO. Expectativa de arrecadação no bidding do Pré-Sal. Disponível em: <http://g1.globo.com/economia/noticia/2013/06/cenario-conservador-para-bonus-do-pre-sal-e-de-r-10-bilhoes-diz-anp.html>. Acesso em 17 de Jun. de 2013.
- [3]. BRASIL. Lei nº 12351. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12351. Acesso em: 17 de Jun. de 2013.
- [4]. PETROBRAS. Plano de Negócios. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/estrategia-corporativa/plano-de-negocios>. Acesso em: 17 de Jun. de 2013.
- [5]. OHARA, S., 1989, *Método de Escolha do Tipo de Broca e Seleção do Peso sobre Broca e Velocidade de Rotação na Perfuração com Mínimo Custo*. Dissertação de M.Sc., UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- [6]. RIG DAILY RATE. Disponível em: <http://www.rigzone.com/data/dayrates>. Acesso em: 17 de Jun. de 2013.
- [7]. FRANÇA, L. F. P., “A Bit-Rock Interaction Model for Rotary-Percussive Drilling”, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, V,48, p.827, 2011.
- [8]. MITCHELL, R. F., MISKA, S. Z., **Fundamentals of Drilling Engineering**. 1e, Richardson, Society of Petroleum Engineers, 2011.
- [9]. THOMAS, J. E., **Fundamentos da Engenharia de Petróleo**, 1e, Rio de Janeiro, Interciência, 2001.
- [10]. BOURGOYNE, A. T. J., MILLHEIM, K. K., CHENEVERT, M.E., YOUNG, F. S. J., 1991, Applied Drilling Engineering. 2nd printing, Richardson, Society of Petroleum Engineers.
- [11]. Schlumberger Oilfield Glossary. Disponível em: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/m/mwd.aspx>
- [12]. Schlumberger Oilfield Glossary. Disponível em: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/l/lwd.aspx>
- [13]. MALOUF, L. R., 2013, *Análise das Operações de Perfuração de Poços Terrestres e Marítimos*, Dissertação de B.Sc., Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [14]. MURRAY, A. S. & CUNNINGHAM, R. A., “Effect of mud column pressure on drilling rates”, Petroleum Transactions, AIME, vol.204, p.196 (1955)
- [15]. ECKEL, J. R., “Effect of Pressure on Rock Drillability”, Petroleum Transactions, AIME, vol.213, p.1 (1958)
- [16]. CUNNINGHAM, R. A. & Eenink, J. G., “Laboratory Study of Effect of Overburden, Formation and Mud Column Pressures on Drilling Rate of Permeable Formations”, Petroleum Transactions, AIME, vol. 217, p.9, (1959).
- [17]. GARNER, A. J. & VAN LINGEN, N. H., “Phenomena affecting drilling rates at depth”, Petroleum Transactions, AIME, vol. 216, p.232, 1959.
- [18]. SIMON, R., “Energy balance in rock drilling”, **SPE Journal**, p.298, 1963.
- [19]. TEALE, R., “The concept of specific energy in rock drilling”, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, vol. 2, p.57, 1965.

- [20]. PESSIER, R. C. & FEAR, M. J., "Quantifying common drilling problems with mechanical specific energy and a bit-specific coefficient of sliding friction", SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Washington, 1992.
- [21]. VAN LINGEN, N. H., "Bottom scavenging – a major factor governing penetration rates at depth", **Journal of Petroleum Technology**, p.187, 1962.
- [22]. DUPRIEST, F. E., KOEDERITZ, W. L., "Maximizing Drill Rates With Real-Time Surveillance of Mechanical Specific Energy", SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, 2005.
- [23]. CAICEDO, H. U., CALHOUN, W. M., EWY, R. T., "Unique ROP predictor using bit-specific coefficient of sliding friction and mechanical efficiency as a function of confined compressive strength impacts drilling performance", SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, 2005.
- [24]. LEDGERWOOD III, L. W., "PFC Modeling of Rock Cutting Under High Pressure Conditions", 1st Canada – U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver, 2007.
- [25]. RAFATIAN, N., MISKA, S. LEDGERWOOD III, L. W., AHMED, R. YU, M., TAKACH, N., "Experimental Study of MSE of a Single PDC Cutter Interacting With Rock Under Simulated Pressurized Conditions", **SPE Drilling & Completion**, V. 25, Number 1, p.10, 2010.
- [26]. MAURER, W. C., "The perfect cleaning theory of rotary drilling", **Journal of Petroleum Technology**, p.1270, 1962.
- [27]. GALLE, E. M., WOODS, H.B., "How to calculate Bit Weight and Rotary Speed for Lowest-Cost Drilling, pt. 1", **Oil and Gas Journal**, p.167, 1960.
- [28]. CUNNINGHAM, R. A., "An empirical approach for relating drilling parameters", **Journal of Petroleum Technology**, vol. 30, p.987, 1978.
- [29]. BOURGOUYNE, A. T. & YOUNG, F. S., "A multiple regression approach to optimal drilling and abnormal pressure detection", Trans SPEJ, vol. 14, p.371, 1974.
- [30]. MASON, L. K. "Three-cone bit selection with sonic logs." SPE Drilling Engineering, p.135, 1987

ANEXO A

```
A=Flatten[Import["Arquivodesonico.xlsx"],1];  
a=Drop[A,1]  
n=Length[a];  
dadoinicial=IntegerPart[a[[1,1]]];  
dadofinal=IntegerPart[a[[n,1]]];  
k=dadofinal-dadoinicial;  
Prof=Table[a[[i,1]],{i,1,n}];  
Do[d=Min[Abs[Prof-i]];Subscript[r,i]=Abs[Prof-i]-d;Subscript[s,  
i]=Position[Subscript[r,i],0.][[1]],{i,dadoinicial,dadofinal}];  
Positions=Flatten[Table[Subscript[s,i],{i,dadoinicial,dadofinal}]];  
Lpositions=Length[Positions];  
NewData=Table[a[[Positions[[i]]]],{i,1,Lpositions}];  
Resposta=Insert[NewData,{depth,\[CapitalDelta]tcompressional},1];  
Export["Arquivo filtrado.xlsx", Resposta];
```

ANEXO B

```
Poco=Import["Arquivodedados.xlsx"]['aba da planilha'];  
In[2]:= auxpoco=Drop[Poco,1];  
In[3]:= np=Length[auxpoco];  
In[4]:= depth=Table[Subscript[prof, i]=auxpoco[[i,1]],{i,1,np}];  
In[5]:= ROP=Table[Subscript[rop, i]=auxpoco[[i,2]],{i,1,np}];  
In[6]:= WOB=Table[Subscript[W, i]=auxpoco[[i,3]],{i,1,np}];  
In[7]:= RPM=Table[Subscript[rpm, i]=auxpoco[[i,4]],{i,1,np}];  
In[8]:= forcajato=Table[Subscript[Fj, i]=auxpoco[[i,5]],{i,1,np}];  
In[9]:=deltap=Table[Subscript[\[CapitalDelta]P,i]=auxpoco[[i,6]],{i,1,p}];  
In[10]:= bitdiam=Table[Subscript[Db, i]=auxpoco[[i,7]],{i,1,np}];  
In[11]:= altdente=Table[Subscript[H, i]=auxpoco[[i,8]],{i,1,np}];  
In[12]:= resist=Table[Subscript[Sc, i]= auxpoco[[i,9]],{i,1,np}];  
In[13]:=Ymodelo=Subscript[b,1]*Subscript[X,1]+Subscript[b,2]*Subscript[  
X,2]+Subscript[X,3]^Subscript[b,3]+Subscript[X,4]^Subscript[b,  
4]+Subscript[b,5]*Subscript[X,5]+Subscript[X, 6]^Subscript[b, 6];  
In[14]:= Ydados=Log[ROP/(RPM*bitdiam)];  
In[15]:= Subscript[X,1]=Table[1,{i,1,np}];  
In[16]:= Subscript[X,2]=Log[WOB/(resist bitdiam^2)];  
In[17]:= Subscript[X,3]=-(deltap/resist);  
In[18]:= Subscript[X,4]=2 - (depth/bitdiam)*(5*10^-5);  
In[19]:= Subscript[X,5]=Log[forcajato/(resist bitdiam^2)];  
In[20]:= Subscript[X, 6]= -(altdente/bitdiam);  
In[21]:= xis= Table[Subscript[X, i],{i,1,6}];  
In[22]:= soma=Sum[(Ymodelo[[i]]-Ydados[[i]])^2,{i,np}];
```



```

In[23]:=Sol=NMinimize[{Re[soma],Im[soma]==0,Im[Ymodelo]==0},
{Subscript[b,1],Subscript[b,2],Subscript[b,3],Subscript[b,4], Subscript[b,
5],Subscript[b, 6]}}];

modelagem=Re[Ymodelo] /. Sol[[2]];

ROPMODELAGEM=Exp[modelagem]*RPM*bitdiam;

comparacao=Table[{depth[[i]],ROPMODELAGEM[[i]],ROP[[i]]},{i,1,np}];

Export["ArquivoRegressao.xlsx",comparacao];

```

ANEXO C

```
Poco2=Import["Arquivodedados.xlsx"][['aba da planilha']];
auxwell=Drop[Poco2,1];
np=Length[auxwell];
depth=Table[Subscript[prof, i]=auxwell[[i,1]],{i,1,np}];
ROP=Table[Subscript[rop, i]=auxwell[[i,2]],{i,1,np}];
WOB=Table[Subscript[W, i]=auxwell[[i,3]],{i,1,np}];
RPM=Table[Subscript[rpm, i]=auxwell[[i,4]],{i,1,np}];
forcajato=Table[Subscript[Fj, i]=auxwell[[i,5]],{i,1,np}];
deltap=Table[Subscript[\[CapitalDelta]P, i]=auxwell[[i,6]],{i,1,np}];
bitdiam=Table[Subscript[Db, i]=auxwell[[i,7]],{i,1,np}];
altdente=Table[Subscript[H, i]=auxwell[[i,8]],{i,1,np}];
resist=Table[Subscript[Sc, i]=auxwell[[i,9]],{i,1,np}];
Ymodelo = Subscript[b, 1]*Subscript[X, 1]+Subscript[b, 2]*Subscript[X,
2]+Subscript[X, 3]^Subscript[b, 3]+Subscript[X, 4]^Subscript[b, 4]+Subscript[b,
5]*Subscript[X, 5]+Subscript[X, 6]^Subscript[b, 6];
Subscript[X, 1]=Table[1,{i,1,np}];
Subscript[X, 2]=Log[WOB/(resist bitdiam^2)];
Subscript[X, 3]=-(deltap/resist);
Subscript[X, 4]=2- (depth/bitdiam)*(5*10^-5);
Subscript[X, 5]=Log[forcajato/(resist bitdiam^2)];
Subscript[X, 6]=-(altdente/bitdiam);
modelo=Re[Ymodelo]/.{Subscript[b, 1]->-3.5905
,Subscript[b, 2]->0.0907
,Subscript[b, 3]->20.0946
,Subscript[b, 4]->39.5662
,Subscript[b, 5]->0.0029
,Subscript[b, 6]->3.0958};
ropcalc=Exp[modelo]*RPM*bitdiam;
NewA=Table[{depth[[i]],ropcalc[[i]],ROP[[i]]},{i,1,np}];
Export["Arquivedecalculo",NewA];
```